



**Maryse
Soares de Oliveira**

**Porto de Aveiro: Modelos de afetação de recursos
aos navios**



**Maryse
Soares de Oliveira**

**Porto de Aveiro: Modelos de afetação de recursos
aos navios**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Matemática e Aplicações, realizado sob a orientação científica do Doutor Agostinho Miguel Mendes Agra, Professor Auxiliar do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos.

o júri / the jury

presidente / president

Professora Doutora Isabel Maria Simões Pereira

Professora auxiliar do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professora Doutora Ana Maria Pinto de Moura

Professora auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Agostinho Miguel Mendes Agra

Professor auxiliar do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos / acknowledgements

Gostaria, em primeiro lugar, de agradecer aos meus pais pelo apoio e oportunidade proporcionados ao longo destes anos e aos meus irmãos por estarem sempre disponíveis para uma conversa divertida mesmo longe uns dos outros. Agradeço a esta pequena família que continua a acreditar em mim e nas minhas capacidades.

Expresso também a minha gratidão à Administração do Porto de Aveiro pelo acolhimento, acompanhamento e companheirismo dos colaboradores ao longo do estágio. Em particular ao Dr. Luís Sousa pela orientação, ajuda e paciência. Agradeço ainda à minha companheira de estágio pela amizade e ajuda.

Gostaria ainda de agradecer ao meu orientador do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro, o Professor Doutor Agostinho Miguel Mendes Agra, pela disponibilidade e apoio prestados ao longo da elaboração deste relatório.

Por último, gostaria de agradecer aos meus amigos, sempre presentes nos momentos mais difíceis, e em particular ao Tiago e à Tânia: obrigada pela paciência e compreensão ao longo destes meses.

Palavras-chave

porto de Aveiro, terminal norte, navios, cais, afetação, postos, guindastes, movimentação de carga

Resumo

O presente relatório realizado no âmbito do curso de Mestrado em Matemática e Aplicações, percurso em Estatística e Investigação Operacional, tem como objetivo o de identificar problemas de otimização que ocorram na gestão portuária do porto de Aveiro, mais particularmente do terminal norte, dando particular ênfase ao problema de afetação dos postos e dos guindastes aos navios.

Com o crescente aumento da quantidade de mercadoria movimentada no terminal norte e, consequentemente, do número de navios entrados no mesmo, torna-se fundamental organizar da melhor maneira possível os recursos disponíveis do cais, nomeadamente o espaço físico e os guindastes. Neste sentido, e com o objetivo de minimizar o tempo de estadia dos navios no terminal norte, apresentam-se vários modelos matemáticos considerando várias situações. Para testar os diferentes modelos foram resolvidos vários exemplos práticos usando o *software Xpress-Optimizer*.

Keywords

Aveiro port, north terminal, ships, quay, assignment, berth, cranes, cargo handling

Abstract

This report, conducted under the master degree on Mathematics and Applications: Statistics and Operational Research, aims to identify optimization problems related to the management of Aveiro port, more specifically of the north terminal giving particular emphasis to the problem of the assignment of berths and quay cranes to ships.

With the increasing amount of commodities moved in the north terminal and, consequently, of the number of ships entering the same, it becomes essential to organize optimally the resources available from the berth, namely physical space and quay cranes. In this sense, and in order to minimize the time of stay of ships in the north terminal, we present several mathematical models considering various situations. In order to test the proposed models, several real examples have been solved using the *software Xpress-Optimizer*.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Apresentação da entidade acolhedora - APA, S.A.	3
2.1	Porto de Aveiro	3
2.1.1	Evolução histórica	3
2.1.2	Organograma	5
2.1.3	Estrutura operacional	5
	Localização e acessibilidades	5
	Zonas portuárias	6
2.2	Porto da Figueira da Foz	10
2.3	Atividades realizadas durante o estágio	11
3	Enquadramento prático do problema de afetação dos postos e dos guindastes aos navios	15
3.1	Modelos de gestão portuária	15
3.2	Funcionamento global do TN do porto de Aveiro	16
3.3	Problemas de otimização na gestão portuária do TN	18
3.4	Posicionamento dos navios e afetação dos guindastes no TN	20
3.4.1	Navios entrados no TN	20
3.4.2	Características e horários de funcionamento dos guindastes	21
3.4.3	Situação atual da afetação dos guindastes e dos postos de acostagem	24
3.4.4	Caracterização do problema	26
3.5	Revisão da bibliografia	27
4	Modelos matemáticos para o problema	31
4.1	Referência bibliográfica base	31
4.2	Formulação matemática principal	32

4.3	Variantes da formulação matemática principal	37
4.3.1	Restrições de Tempo (RT)	37
4.3.2	Restrições do Cais (RC)	40
4.3.3	Restrições de Tempo e do Cais (RTC)	42
4.4	Restrição no número de guindastes	42
4.5	Decomposição do problema	42
4.6	Minimização das trocas de guindastes	45
5	Apresentação dos resultados obtidos	47
5.1	Resultados obtidos usando a formulação matemática principal e as suas variantes	48
5.2	Resultados obtidos usando a decomposição da formulação matemática prin- cipal	56
5.3	Resultados obtidos minimizando o número de trocas de guindastes	58
5.4	Comparação dos resultados obtidos	60
6	Conclusão	63
A	Notícia do mês de maio de 2014 da APA	67
B	Exemplo de escala diária de pessoal do Terminal Norte	71
C	Exemplo de pedido de requisito de guindastes	75
D	Dados dos exemplos	79

Lista de Figuras

2.1	Edifício da APA	4
2.2	Organograma resumido	5
2.3	Zonas portuárias	7
2.4	Setor norte	8
2.5	Terminal de carga geral - Porto da Figueira da Foz	10
3.1	Esquema - Entidades envolvidas no processo de um navio no TN	17
3.2	Gráficos - Navios entrados no TN	21
3.3	Guindastes do TN	22
3.4	Exemplo de escala	25
3.5	Disposição e designação dos guindastes	26
4.1	Exemplo de solução	35
4.2	Esquema - Explicação da restrição (4.13)	37
4.3	Esquema - Explicação da restrição (4.37)	41
5.1	Esquema de solução do exemplo 1	50
5.2	Esquema de solução do exemplo 2	51
5.3	Esquema de solução do exemplo 3	53
5.4	Esquema de solução do exemplo 4	55
5.5	Esquema de solução do exemplo 4 usando a decomposição do problema . .	58
5.6	Esquema de solução do exemplo 4 minimizando as trocas de guindastes . .	60

Lista de Tabelas

3.1	Modelos de gestão portuária	16
3.2	Dimensões médias dos navios e quantidades de mercadoria movimentadas nos últimos quatro anos no TN	21
3.3	Distâncias de segurança entre navios aplicadas no TN	23
5.1	Resultados obtidos para o exemplo 1	49
5.2	Resultados obtidos para o exemplo 2	51
5.3	Resultados obtidos para o exemplo 3	52
5.4	Resultados obtidos para o exemplo 4	54
5.5	Variáveis inicializadas na decomposição do problema	57
5.6	Variáveis inicializadas para minimizar as trocas de guindastes	59
5.7	Comparação dos resultados obtidos	62

Lista de siglas e abreviaturas

APA	-	Administração do Porto de Aveiro, S.A.
APFF	-	Administração do Porto da Figueira da Foz, S.A.
CCOP	-	Centro de Coordenação de Operações Portuárias
ETA	-	<i>Estimated Time of Arrival</i> (tempo estimado de chegada)
ETD	-	<i>Estimated Time of Departure</i> (tempo estimado de saída)
GT	-	<i>Gross Tonnage</i> (Arqueação Bruta)
INE	-	Instituto Nacional de Estatística
IPTM	-	Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos, I.P.
JARBA	-	Junta Autónoma da Ria e Barra de Aveiro
JAPA	-	Junta Autónoma do Porto de Aveiro
JUP	-	Janela Única Portuária
LOA	-	<i>Length Overall</i>
RO-RO	-	<i>Roll-On/Roll-Off</i>
TN	-	Terminal Norte
ZALI	-	Zona de Atividades Logísticas e Industriais

Glossário

Agente de navegação – entidade que representa legalmente uma empresa de navegação num porto. Os agentes de navegação encarregam-se de solicitar os vários serviços portuários nas diversas modalidades do sistema e serviços de outra natureza (operações comerciais do navio no porto, autorizações necessárias para a entrada e saída do navio, contratação de transporte terrestre, abastecimentos do navio, entre outros).

Cais – plataforma fixa onde os navios podem atracar para realizar operações de carga e descarga de mercadorias ou passageiros.

Calado – designação dada à profundidade de submersão do navio na água. O conhecimento do calado do navio em cada condição de carga e de densidade da água (salinidade e temperatura) é necessário para determinar se um navio pode ou não navegar em zonas pouco profundas.

Empresa de estiva – empresa responsável pela carga e descarga do navio, bem como pela arrumação da mercadoria no cais, usando para tal a infraestrutura (terraplenos, cais) e superestrutura (edifícios, maquinarias, guindastes, empilhadores) do terminal.

Guindaste – equipamento utilizado na movimentação e elevação das cargas (equivalente a uma grua).

GT (Arqueação Bruta) – corresponde ao volume interno total de um navio.

Hinterland – corresponde às áreas de origem e destino das mercadorias, ou seja, corresponde às áreas de influência do porto.

LOA (*Length Overall*) – medida mais usada para indicar o comprimento máximo de um navio. Corresponde ao comprimento de “fora a fora”, entre as partes do casco mais salientes à proa e à popa, medido perpendicularmente à linha de água.

Manifesto – documento legal no qual estão descritas as quantidades e o tipo de mercadorias transportadas para carga/descarga, o responsável do pagamento e as assinaturas de garantia, entre outras informações.

Milha náutica – unidade de distância que equivale, aproximadamente, a 1,8 km.

Operador – à semelhança da empresa de estiva, o operador é a empresa responsável pela mercadoria de um navio com a diferença de que o operador tem a concessão da infraestrutura de um terminal e usa a sua própria superestrutura.

Processo – para cada navio que entra no porto atribui-se um número de processo que está associado ao documento (o chamado processo do navio) onde constam todas as informações recolhidas ao longo da estadia do navio no porto: tipo e quantidade de mercadoria movimentada, terminal, data e hora de entrada/saída, data e hora de acostagem/desacostagem, operador/empresa de estiva responsável, equipamentos utilizados e custos associados, autorizações, manifesto, *etc.*

RO-RO – abreviatura de *Roll-On/Roll-Off*. São os navios em que a carga entra e sai dos porões geralmente sobre rodas (automóveis, autocarros, *etc.*).

Capítulo 1

Introdução

Os portos comerciais têm vindo a ter cada vez mais importância na economia dos países nos quais estão inseridos. Hoje em dia, são considerados como sendo “*motores para o desenvolvimento económico regional e mesmo nacional*” (Monteiro - 2010) constituindo elos de ligação entre o transporte marítimo e o seu *hinterland*. Este meio de transporte tem tido custos comparativamente baixos e é considerado o meio de transporte mais amigo do ambiente trazendo dessa forma inúmeras vantagens para o transporte de mercadorias em quantidades elevadas.

Face às vantagens de que dispõe o meio de transporte marítimo, tem-se verificado um aumento da procura do mesmo o qual tem tido uma repercussão significativa e positiva na evolução dos portos comerciais, mais particularmente dos portos portugueses. Segundo Sequeira (2013), “*a sua localização estratégica confere-lhes uma vantagem geográfica potenciada pela globalização*”, tendo potencial para fazer do país um local estratégico no transporte marítimo internacional.

De acordo com Sequeira (2013), os portos portugueses têm vindo a registar, nos últimos anos, aumentos significativos no que se refere à movimentação portuária. Seguindo esta evolução, o Porto de Aveiro também tem vindo a aumentar a movimentação de carga pelos seus terminais. Dessa forma, o estudo realizado neste relatório visa identificar problemas de otimização e agilizar a organização do terminal norte (TN) no que se refere ao posicionamento dos navios no cais bem como a afetação dos guindastes aos mesmos. O presente relatório segue a estrutura que a seguir se apresenta.

No Capítulo 2, faz-se uma breve apresentação da entidade acolhedora, nomeadamente da Administração do Porto de Aveiro - APA descrevendo os portos de Aveiro e da Figueira

da Foz. Faz-se ainda uma breve apresentação das atividades realizadas durante o estágio e identificam-se alguns problemas de otimização que ocorram na gestão portuária do porto de Aveiro.

No Capítulo 3, descrevem-se os problemas de otimização identificados no Capítulo 2 mais ao pormenor e apresenta-se o funcionamento global do porto de Aveiro e mais particularmente do TN. Numa segunda fase, as características do TN e a situação atual relativa à gestão e afetação dos recursos aos navios, nomeadamente dos postos de acostagem e dos guindastes, são descritas. De maneira a fomentar o estudo realizado neste relatório, apresenta-se a evolução do TN relativamente ao número de navios entrados, a sua dimensão e a mercadoria movimentada nos últimos anos e faz-se uma revisão da literatura relativa ao mesmo tipo de estudos e que foi usada na elaboração deste trabalho.

O Capítulo 4 trata o problema do posicionamento dos navios no cais e da afetação dos guindastes aos mesmos, apresentando vários modelos matemáticos para a resolução do mesmo. Apresenta-se, numa primeira fase, uma formulação matemática principal bem como as suas variantes, que visam melhorar a eficiência dos programas relativamente aos tempos de execução dos programas. Apresenta-se ainda uma restrição relativa ao número de guindastes que podem operar por período de tempo e por navio. Por outro lado, tenta-se minimizar o número de trocas de guindastes de maneira a evitar que todos os guindastes disponíveis em cais possam operar num mesmo navio. Por fim, separa-se o problema, achando, numa primeira fase, a disposição dos navios no cais, para depois efetuar a afetação dos guindastes aos mesmos.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos para as várias formulações propostas e para quatro exemplos inspirados no movimento verificado no início do ano de 2014 no TN do porto de Aveiro. De maneira a obter resultados computacionais, usou-se o *software Xpress-Optimizer*, e estes são comparados relativamente ao esquema da solução e ao tempo de execução de cada programa.

Por fim, no Capítulo 6 abordam-se as limitações e as conclusões retiradas do desenvolvimento do projeto.

Capítulo 2

Apresentação da entidade acolhedora - APA, S.A.

2.1 Porto de Aveiro

A Administração do Porto de Aveiro é uma sociedade de capitais exclusivamente públicos com vista na exploração económica, conservação e desenvolvimento sustentável do porto de Aveiro. Esta organização desenvolve a sua atividade com o objetivo de alcançar um serviço eficiente e de qualidade, tornando-o mais competitivo tanto a nível nacional como a nível internacional. É neste contexto que o porto de Aveiro assume como missão “*facultar o acesso competitivo de mercadorias aos mercados regionais, nacionais e internacionais, promovendo assim, o desenvolvimento económico da sua região*” (Relatório de Sustentabilidade da APA - 2012).

2.1.1 Evolução histórica

Situado na costa atlântica do centro de Portugal, o porto de Aveiro tem a sua origem intimamente ligada à história da ria bem como à obra de fixação e abertura da barra de Aveiro.

Desde meados do século XVIII efetuaram-se várias intervenções técnicas com vista à abertura da ligação do mar à ria de Aveiro.

A 3 de abril de 1808 é marcada a abertura da barra de Aveiro, resultado do estudo levado a cabo pelos engenheiros Reinaldo Oudinot e Luís Gomes de Carvalho, constituindo assim o

primeiro marco para o desenvolvimento deste porto. Com a abertura do porto ao comércio internacional, com um setor de pesca dos mais importantes a nível nacional, a região viu a sua riqueza crescer devido à instalação de novas indústrias.

Depois da fixação da barra, em meados do séculos XX, é criada a Junta Autónoma da Ria e Barra de Aveiro (JARBA), passando depois a Junta Autónoma do Porto de Aveiro (JAPA). Em 1974, o “Plano Diretor de Desenvolvimento e Valorização do Porto e Ria de Aveiro” aponta para a deslocação dos terminais portuários para uma zona mais próxima da entrada da Barra, onde se situa atualmente a estrutura comercial mais importante do porto.

No ano de 1998, segundo o Decreto-Lei nº 339/1998, a JAPA passou a ser a atual Administração do Porto de Aveiro – APA, S.A (ver Figura 2.1), sendo lhe assim reconhecido o estatuto de porto de âmbito nacional e atribuídas novas competências no desenvolvimento do porto e maior autonomia. Com a revisão do “Plano de Ordenamento e Expansão do Porto de Aveiro” a APA inclui a ligação ferroviária do porto à linha do norte.



Figura 2.1: Edifício da APA

A 3 de novembro de 2008, segundo o Decreto-Lei nº 210/2008, foi criada a Administração do Porto da Figueira da Foz, S.A. – APFF, S.A., que se trata de uma sociedade anónima de capitais exclusivamente públicos integralmente detidos pela APA.

2.1.2 Organograma

Atualmente a APA é organizada segundo o organograma apresentado na Figura 2.2.

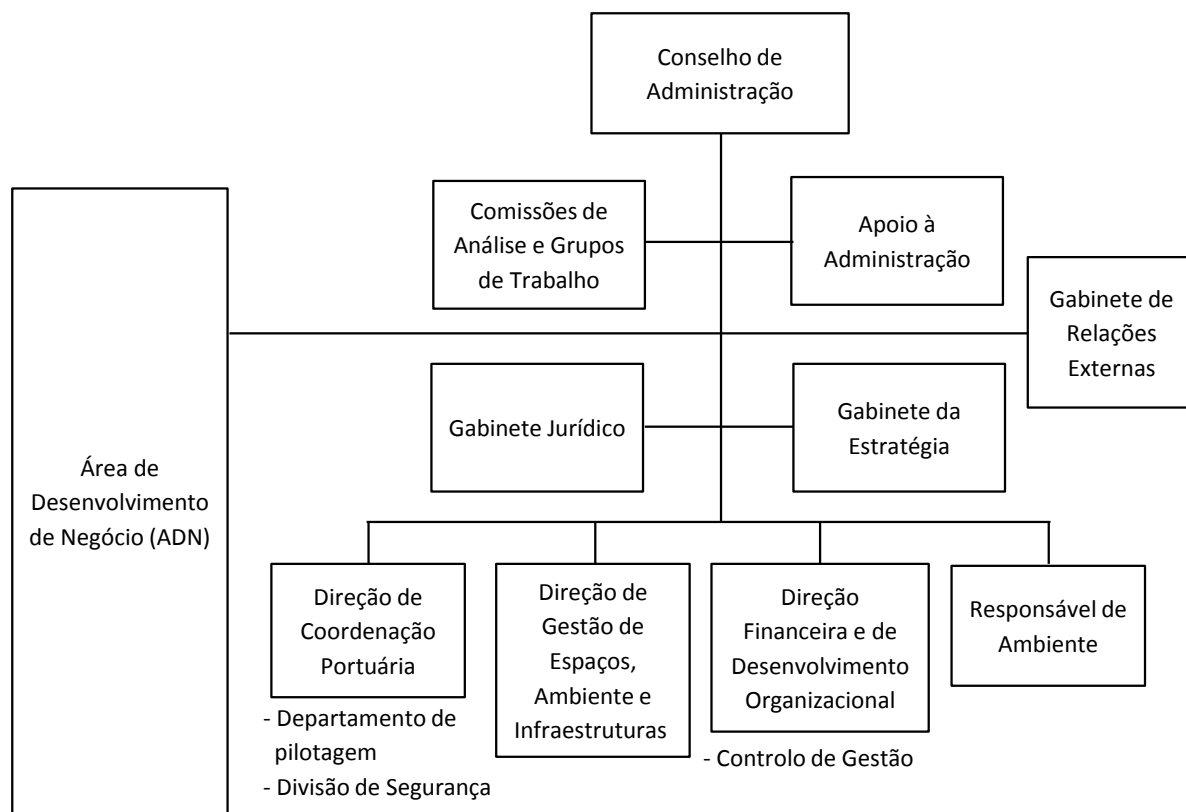


Figura 2.2: Organograma resumido

2.1.3 Estrutura operacional

Localização e acessibilidades

A sede da APA situa-se no forte da Barra, edifício 9, no distrito de Aveiro (ver Figura 2.1). Todos os seus terminais encontram-se na Gafanha da Nazaré com exceção do terminal sul localizado no concelho de Aveiro. Situado na laguna interior, denominada ria de Aveiro, este porto apresenta uma posição vantajosa que lhe permite servir o vasto *hinterland* económico da zona centro e norte do país, bem como o centro de Espanha. Contrariamente ao que acontece na maior parte dos portos nacionais, o porto de Aveiro não se encontra sujeito a pressões urbanas devido às boas acessibilidades terrestres de que ele dispõe.

Os acessos rodoviários ao porto de Aveiro permitem a ligação fácil, rápida e descongestionada às principais cidades do país e do centro de Espanha. A fluidez das auto-estradas que o servem (A1, A29, A25, A17, A27) e o bom estado das vias entre os vários terminais portuários fazem deste porto um importante nó de desenvolvimento do Transporte Marítimo de Curta Distância (TMCD).

O porto de Aveiro dispõe também da mais recente infraestrutura ferroviária a nível nacional, a qual foi inaugurada a 27 de março de 2010. Assim, o porto encontra-se ligado à linha nacional e ao resto da Europa integrando-se na Rede Transeuropeia de Transportes. Atualmente, entram diariamente cerca de 6 comboios no porto de Aveiro.

Com o intuito de tornar o porto mais competitivo tanto a nível nacional como a nível internacional o seu acesso marítimo foi alterado recentemente, oferecendo agora a possibilidade de entrada de navios até 10 metros de calado e comprimento máximo de 200 metros. A entrada do porto, a denominada barra, encontra-se a 1,5 milhas dos terminais do setor norte e a 4,5 milhas do setor sul. Assim, o canal principal de navegação tem um comprimento de cerca de 9 km, desde a barra até Aveiro.

Zonas portuárias

Atualmente, o porto de Aveiro é a mais recente solução multimodal de Portugal. Com um tráfego anual de cerca de 4 milhões de toneladas de mercadorias, este porto desempenha um papel fundamental nos diversos setores do seu atual *hinterland*, tais como a indústria metalúrgica, de madeira, cerâmica, química, agroalimentar ou ainda de construção. Dispõe de 5 terminais adequados para movimentar todo o tipo de mercadorias e 2 terminais especializados para a pesca, como se pode ver na Figura 2.3.



Figura 2.3: Zonas portuárias

- **Setor norte:**

O TN, situado no setor norte do porto de Aveiro, é o principal terminal polivalente do porto. Está vocacionado para a movimentação de cargas secas, sendo as mercadorias mais movimentadas as seguintes: cimento, pasta de papel, aglomerados de madeira, perfilados metálicos, argilas e cereais. Dispõe de 900 metros de cais com oito postos de acostagem, possuindo uma grua móvel com capacidade máxima de 35 toneladas e seis gruas de 12 toneladas. Com a ampliação do TN, passou-se a dispor de mais 200 metros de cais com dois postos de acostagem. Com vista à diversificação do seu mercado, a APA apostou em dois novos segmentos de mercados: RO-RO e capacidade de instalações para a movimentação de contentores. Assim, o denominado terminal RO-RO e contentores passou a disponibilizar um cais de 450 metros e a oferecer uma rampa para serviços marítimos RO-RO (ver Figura 2.4). Recentemente, em março de 2010, abriu a ligação ferroviária à linha norte. Tem ainda a vantagem de dispor de

uma grande área para armazenar as mercadorias, tanto a coberto como a descoberto.

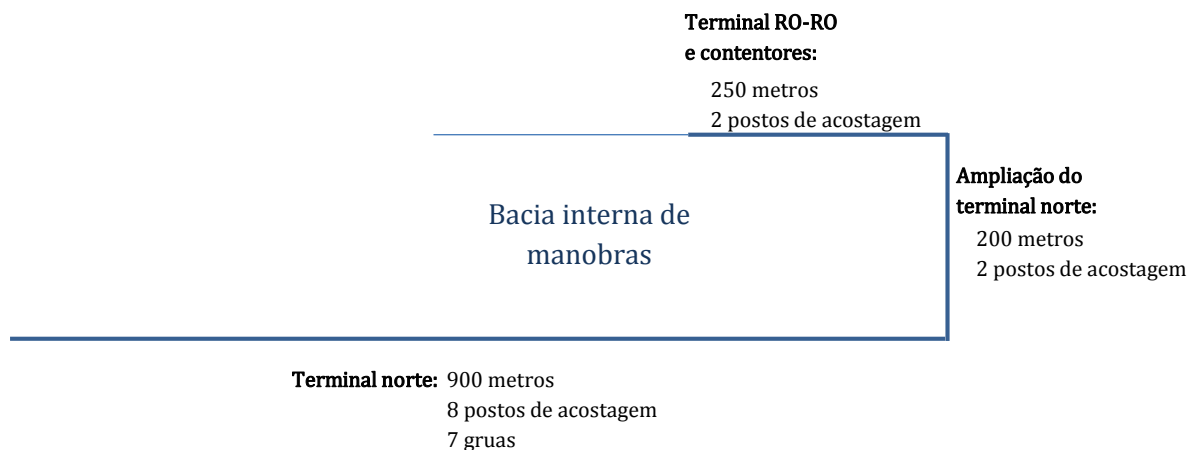


Figura 2.4: Setor norte

- **Terminal sul:**

A exploração comercial da operação portuária deste terminal polivalente foi concessionada à empresa Socarpor – Sociedade de Cargas Portuárias (Aveiro), S.A., em regime de serviço público. Oferece um cais de 400 metros com quatro postos de acostagem que permitem a movimentação de produtos metalúrgicos, cimento, pasta de papel e produtos agroalimentares entre outros.

- **Terminal de granéis sólidos:**

Este terminal dispõe de um cais de 750 metros de comprimento dos quais 400 metros são destinados ao setor agro-alimentar e 350 para granéis não alimentares. Apresenta a infraestrutura mais avançada do país para a movimentação de granéis agroalimentares, a qual pertence à empresa Socarpor, S.A., tentando assim responder às necessidades dos seus clientes com elevado nível de qualidade e eficiência a custos competitivos.

- **Terminal de granéis líquidos:**

Este terminal dispõe de seis pontes-cais que permitem a movimentação e armazenagem de produtos químicos e vitivinícolas e derivados de petróleo. As suas instalações são exploradas por entidades privadas nacionais das quais se destacam a BP e a PRIO Energy.

- **Posto de pesca costeira:**

Este setor oferece um conjunto de infraestruturas destinadas à descarga, armazenagem e comercialização de pescado para comerciantes locais. O porto de abrigo para a pesca costeira tem capacidade para 136 embarcações e 72 armazéns de apresto para os comerciantes. A fábrica e a lota estão concessionadas à empresa Docapesca, Portos e Lotas, S.A..

- **Porto de pesca de largo:**

Este terminal, com dezassete pontes-cais, serve os armadores de pesca de largo e as indústrias de processamento de pescado instaladas na Gafanha da Nazaré. Inclui um terminal especializado de descarga do pescado com 160 metros de comprimento que oferece as infraestruturas necessárias ao bom funcionamento de uma unidade desta natureza.

O porto de Aveiro integra ainda um setor logístico no qual estão inseridas a plataforma multimodal de Cacia bem como áreas de reserva de terrenos para a futura implantação de atividades industriais e logísticas.

- **Plataforma multimodal de Cacia:**

A plataforma multimodal, gerida pela APA, é destinada à instalação e exploração de atividades logísticas que utilizem o transporte ferroviário. Está a uma distância de cerca de 9 km dos terminais portuários, incluindo uma ligação direta à linha do norte. Este polo é ainda caracterizado pela presença de oito linhas, das quais duas são destinadas à carga e descarga de mercadorias e as restantes seis para movimentação.

- **ZALI – Zona de Atividades Logísticas e Industriais:**

Situada entre o terminal RO-RO e o terminal de granéis sólidos, esta área é servida por ótimas acessibilidades rodoviárias e ferroviárias. A ZALI, uma vez aí implementada, será uma plataforma logística portuária intermodal com o objetivo de facilitar a instalação de operadores logísticos e empresas para as quais a proximidade com o porto traz inúmeras vantagens tais como um fator competitividade elevado, valor acrescentado à mercadoria, *etc.* Esta zona vai dispor de cerca de 1080 metros de cais de acostagem com fundos até 12 metros de profundidade.

2.2 Porto da Figueira da Foz

Tal como Aveiro, a cidade da Figueira da Foz tem a sua origem muito ligada ao mar, razão pela qual também oferece um porto marítimo.

Sofrendo várias alterações ao longo dos anos, foi através do Decreto Lei nº210/2008, de 3 de novembro, que a APA passou a deter a então criada Administração do Porto da Figueira da Foz, S.A. – APFF, S.A..

Localizado no centro da costa atlântica portuguesa, no distrito de Coimbra, o porto da Figueira da Foz é um porto vocacionado para o transporte marítimo de curta distância. Devido à sua posição geográfica vantajosa, este porto consegue servir o vasto *hinterland* económico no qual está inserido (zona centro e norte de Portugal e centro de Espanha).

Oferece ótimas condições de acessos rodoviários bem como acessos ferroviários com a ligação à rede nacional e de Espanha. Relativamente ao acesso marítimo, este é restrito devido às atuais condições do porto. A APFF estabelece então aos operadores a prática de um calado máximo de 6 metros, entre 1 de novembro e o final de fevereiro, e de 6,5 metros durante o restante período do ano. A entrada na barra é apenas permitida para navios cujo comprimento máximo não excede 120 metros.

No que diz respeito às suas instalações, este porto dispõe de dois terminais comerciais (ver Figura 2.5) e três áreas especializadas (uma nova área privada para construção e reparação naval e duas áreas destinadas às indústrias náutica e de pesca).



Figura 2.5: Terminal de carga geral - Porto da Figueira da Foz

2.3 Atividades realizadas durante o estágio

O estágio, com orientação do Dr. Luís Sousa, teve lugar no gabinete de estatística, o qual está inserido na direção financeira de desenvolvimento organizacional da APA (departamento de informática - ver Figura 2.2). Durante o período de estágio, com duração de cerca de seis meses, as atividades realizadas no dia a dia giraram em torno da estatística dos portos de Aveiro e da Figueira da Foz.

A estatística portuária tem como principal objetivo evidenciar a evolução do porto pelo que se baseia em indicadores relativamente simples, dos quais podemos destacar os seguintes:

- quantidade e tipo de mercadorias movimentadas;
- tipo de operação efetuada (carga/descarga);
- nº de navios entrados no porto;
- LOA e GT dos navios;
- data e hora de entrada/saída e tempo de estadia dos navios no porto;
- origem/destino dos navios;
- agentes, clientes e operadores.

O acesso a esses dados é feito através dos programas SIGAPA e SIGFOZ que integram os módulos de estatística, faturação, tarifário e gestão de espaços dos portos. Também podem ser usados a JUP - Janela Única Portuária, e folhas de Excel realizadas por colaboradores com informações pormenorizadas relativamente aos navios e aos comboios. O tratamento dos dados recolhidos é feito, de uma maneira geral, usando folhas de cálculo do Microsoft Excel.

De seguida, apresentam-se as principais atividades desenvolvidas ao longo do estágio.

A estatística desenvolvida pelo porto, bem como a sua divulgação, são fundamentais para dar a conhecer a evolução do porto. Assim sendo, a área da estatística dos portais da APA (www.portodeaveiro.pt) e da APFF (www.portofigueiradafoz.pt) é atualizada mensalmente com a publicação da quantidade movimentada (em toneladas) por tipo de mercadoria e por tipo de operação bem como o nº de navios entrados no porto, o GT e o LOA totais do mês em questão, usando para tal o *BackOffice* dos portais. Apresentam-se ainda as variações dos diferentes indicadores com os últimos dois anos.

A elaboração de *reportings* legais, que passam pela disponibilização de tabelas de dados, destinados ao INE e ao IPTM, que tem por missão “regular, fiscalizar e exercer funções de

coordenação e planeamento do sector marítimo-portuário e supervisionar e regulamentar as atividades desenvolvidas neste setor” (<http://www.imarpor.pt/>) é realizado periodicamente com informações relativas aos indicadores mais comuns da estatística portuária.

O porto de Aveiro, sendo um dos 5 principais portos a nível nacional, elabora regularmente vários artigos onde constam a sua evolução e *performances* ao longo do tempo (ver Apêndice A).

Com o objetivo de dar a conhecer realidades diferentes da do porto de Aveiro, o orientador da entidade acolhedora possibilitou a visita de portos de referência nacional, nomeadamente dos portos da Figueira da Foz, Sines e Setúbal. Foi assim possível entender o funcionamento global de portos de outras dimensões bem como a estatística neles desenvolvida.

Para além das atividades já descritas, destacam-se ainda as seguintes:

- organização de dados com interesse para a estatística portuária e realização de relatórios estatísticos disponibilizados para os colaboradores da APA com o objetivo de apresentar a evolução do porto de Aveiro relativamente às importações/exportações, tipos e quantidades de mercadorias, *rankings* (países importadores/exportadores, mercadorias mais movimentadas, ...), frequência dos navios no porto, *etc*;
- verificação da integridade das bases de dados do porto de Aveiro relativamente à codificação das mercadorias e dos navios, dos tipos de carga e dos registos respeitantes a cada processo de navio;
- disponibilização, trimestralmente, da tabela relativa ao escalonamento de navios para o Gabinete de Estratégia na qual consta o número de navios escalados por dimensão e terminal;
- visita à Escola Superior Náutica Infante D. Henrique tendo assim oportunidade de conversar com professores acerca do negócio desenvolvido nos portos;
- participação no Fórum Empresarial do Mar, representando o porto de Aveiro e estabelecendo contacto com pessoas do setor.

Paralelamente, com vista à realização do relatório de estágio, tentou-se, ao longo do mesmo, identificar problemas de otimização que ocorram na gestão portuária do porto de Aveiro. Sendo o porto uma entidade com um funcionamento no dia a dia bastante complexo, percebê-lo tornou-se fundamental.

A principal atividade de um porto gira em torno da movimentação de mercadorias que chegam por via marítima, rodoviária e ferroviária. No porto de Aveiro, as decisões que envolvem essa atividade são tomadas pelo Centro de Coordenação de Operações Portuárias - CCOP, situado no setor norte, o qual pode ser considerado como o elo de ligação entre as várias entidades que trabalham juntamente com o porto. No dia a dia, as principais atividades que estão a cargo do CCOP são as seguintes:

- processo de chegada e saída dos navios e dos combois;
- afetação dos postos de acostagem e dos guindastes aos navios;
- armazenamento das mercadorias;
- escalas de pessoal;
- processo de faturação.

Existindo aqui um processo de tomada de decisões é possível aparecerem problemas de otimização na gestão portuária, os quais podem surgir nas seguintes áreas:

- armazenamento/disposição das mercadorias no cais;
- organização das chegadas e saídas dos comboios no terminal;
- afetação dos guindastes e dos postos de acostagem aos navios;
- gestão das equipas de trabalho.

Mais à frente, no Capítulo 3, serão abordados mais ao pormenor os problemas de otimização acima apresentados dando particular ênfase ao problema de afetação dos postos de acostagem e dos guindastes aos navios que movimentam mercadorias no TN e para o qual serão apresentados vários modelos matemáticos para a sua resolução no Capítulo 4. O tema desenvolvido neste relatório baseia-se nesse último problema, o qual será tratado daqui em diante.

De uma maneira geral, o contacto com o mundo do trabalho, proporcionado pelo estágio, permitiu dar a conhecer a dinâmica de uma empresa no dia a dia, mais particularmente do porto de Aveiro, o que possibilitou adquirir conhecimentos acerca do seu funcionamento e dos negócios desenvolvidos nele.

Capítulo 3

Enquadramento prático do problema de afetação dos postos e dos guindastes aos navios

Geralmente, no ponto de vista do Homem, um porto é considerado como sendo uma simples plataforma para carga e descarga de mercadorias com recurso ao transporte marítimo. Na realidade um porto, pelas suas funções, características e envolvente, é “algo” muito mais complexo. Para além de ser uma porta por onde entram e saem mercadorias, pessoas e informações, o porto pode ser considerado como o elo de ligação e coordenação entre as seguintes componentes com as quais lida diariamente:

- indústrias, clientes, agentes de navegação, empresas de estiva e operadores;
- interior (*hinterland*) e exterior do país;
- transportes marítimo, rodoviário e ferroviário.

Hoje em dia os portos têm ainda de ser encarados como centros logísticos, visto que por eles passam mercadorias e circulam navios e outros veículos, estabelecendo-se assim uma troca de informações a um ritmo cada vez mais acelerado.

3.1 Modelos de gestão portuária

Dada a importância estratégica dos portos no desenvolvimento da economia de um país, estes têm tido um controlo direto dos poderes públicos. Por outro lado, com a crescente necessidade de ampliação e modernização dos portos, o envolvimento dos agentes económicos

privados na gestão dos mesmos tem-se traduzido em investimentos cada vez maiores. Os motivos que levam à reestruturação de um porto variam de porto para porto tendo como principal objetivo o de satisfazer as necessidades dos utilizadores do porto, ou seja, aumentar a qualidade e eficiência dos serviços e reduzir os custos. Quer seja pública, privada ou mista, a gestão portuária tem a sua estratégia fortemente orientada para o mercado no qual está inserida. Os diferentes modelos de gestão portuária são distinguidos por um conjunto de características apresentados Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Modelos de gestão portuária

	Infraestruturas	Superestruturas	Trabalho Portuário - Tipo de Empresa
Porto Público	Público	Público	Público - Autoridade Portuária
<i>Tool Port</i>	Público	Público	Privado - Empresa de Estiva
<i>Landlord Port</i>	Público	Privado	Privado - Operador
Porto Privado	Privado	Privado	Privado - Empresa dona

Atualmente o TN do porto de Aveiro está sob gestão portuária do tipo *Tool Port*, ou seja, as infraestruturas e superestruturas são públicas mas são utilizadas por entidades privadas para a movimentação das mercadorias. Com o objetivo de aumentar a produtividade do terminal, as empresas de movimentação de carga têm investido em superestruturas próprias (gruas e empilhadoras), facilitando assim a futura transição para um *landlord port* tal como acontece no terminal sul.

As condições de gestão portuária do TN e o seu fácil acesso foram razões que levaram à escolha deste terminal para a identificação de possíveis problemas de otimização. Assim, os problemas apresentados ao longo do relatório de estágio são referentes ao mesmo.

3.2 Funcionamento global do TN do porto de Aveiro

A satisfação dos clientes, a coordenação de todas as operações envolvidas no processo de movimentação de mercadorias e dos vários meios de transporte, a melhor gestão possível do espaço e das equipas de trabalho são preocupações constantes do porto, mais particularmente do TN, para o seu bom funcionamento.

Como na maior parte dos portos, o fluxo de mercadorias para o TN pode ser feito por via

marítima, rodoviária e ferroviária, o que obriga a uma coordenação constante de todas as componentes envolvidas na gestão do porto.

A Figura 3.1 esquematiza o funcionamento global do TN do porto de Aveiro.

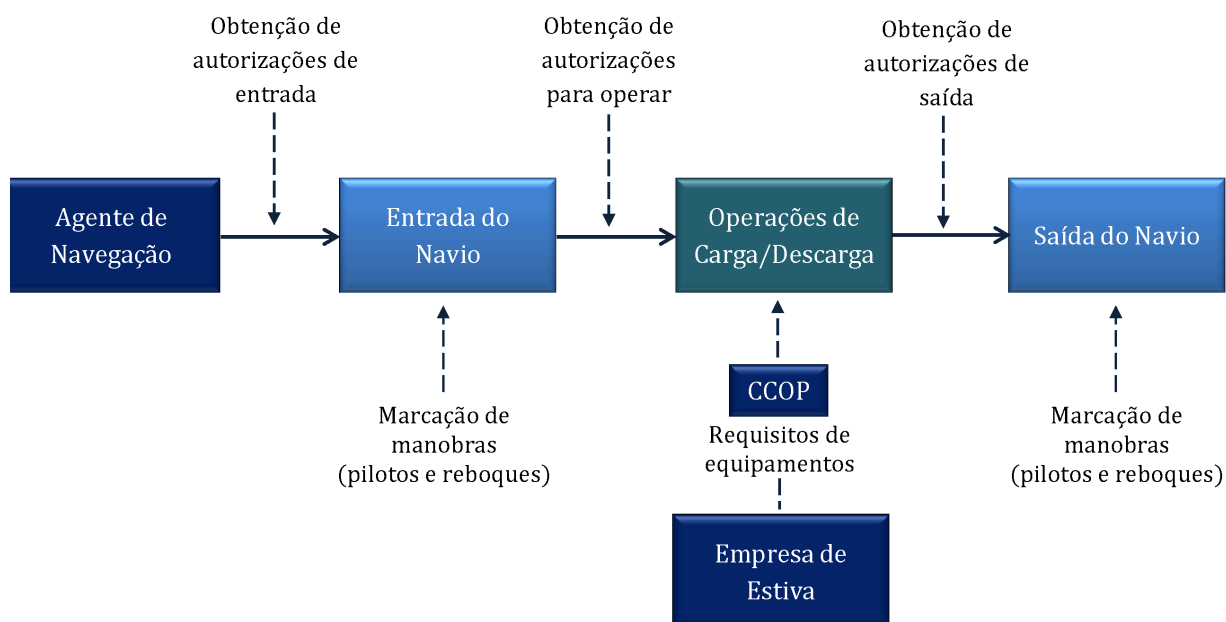


Figura 3.1: Esquema - Entidades envolvidas no processo de um navio no TN

O agente de navegação, representante do armador no porto, é o responsável pelo navio desde a sua chegada até à sua saída. Assim, quando o navio passa a linha imaginária das 6 milhas, o agente encarrega-se de anunciar a sua chegada criando um registo na JUP com a identificação e características do navio, caracterização da carga, origem/destino do navio, *etc.* A JUP permite a simplificação dos procedimentos administrativos aduaneiros e permite ainda que toda a informação seja tratada por via eletrónica. Dessa forma, o sistema envia uma série de avisos para as diversas entidades envolvidas no processo.

Uma das funções do agente é a de obter as autorizações das diversas entidades (autoridade portuária, autoridade da fronteira, capitania, autoridade sanitária e alfândega) para a entrada do navio no porto. Obtidas essas autorizações, o navio pode seguir para o porto com auxílio dos pilotos e rebocadores previamente contactados pelo agente e que validam a viabilidade da operação.

Para efetuar as operações de carga e descarga em cais são necessárias mais autorizações por parte do CCOP, da alfândega e da capitania. A empresa de estiva, responsável pela

movimentação da carga, pode assim requisitar os equipamentos de que necessita (nomeadamente os guindastes) para efetuar tal operação.

Terminada a operação de carga/descarga do navio, o processo de saída é semelhante ao de entrada, sendo necessárias as várias autorizações de saída e o auxílio dos pilotos e rebocadores nas manobras.

3.3 Problemas de otimização na gestão portuária do TN

Ao longo do estágio foi possível observar o funcionamento do TN no seu dia a dia. Face à elevada quantidade e aos diversos tipos de mercadorias movimentadas no mesmo torna-se necessário existir a maior coordenação possível entre as várias entidades/tarefas envolvidas no processo de movimentação de carga.

O negócio do porto está profundamente ligado ao negócio das indústrias que constituem o seu *hinterland* e que recorrem aos seus serviços, o que faz do porto uma entidade bastante passiva no que toca ao movimento global do mesmo. É comum verificar alturas de muito movimento no porto como também alturas de muito pouco movimento.

Independentemente do movimento no terminal, o CCOP tem de gerir as informações que vai recebendo por parte das várias entidades que trabalham com o porto, as mercadorias que vão chegando pelos vários meios de transporte, os problemas/complicações que vão surgindo no dia a dia, as equipas de trabalho do cais, os equipamentos do porto (guindastes, empilhadores, ...), as burocracias, *etc.* Dessa forma, sendo difícil prever e programar os acontecimentos com muita antecedência a comunicação entre as várias entidades é constante e muito importante.

De seguida apresentam-se quatro áreas de trabalho do TN que mostram características que possibilitam o estudo de possíveis problemas de otimização.

O TN dispõe de uma **ligação ferroviária**, desde 2010, que lhe permitiu aumentar o seu mercado para a movimentação de outras mercadorias. Atualmente a quase total capacidade da linha ferroviária é utilizada para a exportação de cimentos chegando diariamente cerca de seis comboios, aproximando-se assim da sua capacidade máxima. O CCOP não decide efetivamente a chegada das composições ao cais, recebendo apenas a informação, por parte

da CP Portugal, de que está a chegar um comboio. Dessa forma, o trabalhador designado pela escala de pessoal para essa tarefa (ver Apêndice B) desloca-se até ao sinal para o poder ligar e volta para o TN para abrir o portão permitindo assim a entrada do comboio. Face à elevada quantidade de cimento que chega diariamente ao TN foi delimitada uma zona do cais onde a empresa de estiva tem a liberdade de armazenar a carga da maneira que pretende, podendo pedir autorização para armazenar noutra zona se tal for necessário. Dessa forma, e por uma questão de custos de armazenagem, o CCOP verifica diariamente as áreas ocupadas pelas mercadorias. A comunicação entre o CCOP, as empresas de estiva e a CP Portugal é fundamental de forma a coordenar da melhor maneira possível a chegada dos comboios, a disponibilidade do cais e dos trabalhadores e o armazenamento das mercadorias. Seria portanto interessante cruzar as informações de que dispõem o CCOP, a empresa de estiva e a CP Portugal de maneira a organizar a chegada dos comboios e a disposição das mercadorias no cais (mais particularmente do cimento) com o objetivo de minimizar o trabalho/trajeto dos empilhadores e armazenar a mercadoria o mais perto possível do navio que a vai operar, *etc.* Este estudo teria de ser realizado considerando que o CCOP e a empresa de estiva formam uma única entidade de maneira a satisfazer as condições e necessidades de cada uma delas.

O TN tem a vantagem de dispor de uma grande área de terraplenos que lhe confere uma grande capacidade de **armazenamento das mercadorias** que vai exportando e importando. A maior parte das mercadorias são armazenadas a descoberto mas o terminal dispõe de oito armazéns que permitem o armazenamento coberto das mercadorias que necessitam de estar protegidas das condições meteorológicas (pastas de papel, granéis sólidos, ...). O armazenamento das mercadorias tem custos associados para as empresas de estiva de acordo com a área de cais ocupada e o tempo total de ocupação. Em épocas de muito movimento, o cais fica muito ocupado congestionando o trânsito interno dos camiões, dos empilhadores e dos comboios. Com o objetivo de organizar o cais e facilitar a carga e descarga dos navios o cais foi dividido por zonas e tipos de mercadorias. Considerando apenas as mercadorias mais movimentadas no TN, é comum ver os produtos metalúrgicos numa zona do cais, os produtos de madeira noutra e os cimentos na zona sem armazéns do cais. Apesar de existir alguma liberdade no que toca ao armazenamento das mercadorias por parte das empresas de estiva (caso do cimento), é da responsabilidade do CCOP a disposição das cargas no cais. Dessa forma, a comunicação com as empresas de estiva responsáveis pelas operações de carga/descarga é constante. A disponibilização das informações por parte das empresas de estiva quanto à mercadoria que vai ser movimentada facilita a tarefa de armazenamento.

Consoante os dados recebidos, procura-se organizar as mercadorias de acordo com o seu tipo e o tempo que vai permanecer armazenada em cais.

Como em todas as empresas que têm equipas de trabalho que funcionam por turnos existe uma preocupação constante na **gestão das equipas de trabalho** do terminal. Atualmente existem poucos trabalhadores para a atividade que o terminal tem tido, apesar disso não afetar a realização das tarefas. É comum um trabalhador ter de prolongar por umas horas o seu turno, ou realizar dois turnos seguidos, sendo assim responsável por tarefas menos pesadas. Devido ao tipo de atividade desenvolvida no porto, num dia um trabalhador pode ser suficiente para dar resposta à quantidade de trabalho existente e no dia seguinte dez trabalhadores já podem não ser suficientes. Os trabalhadores têm uma ideia dos turnos que terão de realizar no mês e diariamente é realizada uma escala de pessoal pelo CCOP (ver Apêndice B). Nesta área também seria interessante realizar um estudo de otimização de forma a organizar as equipas de trabalho e verificar se, de facto, o número de trabalhadores do TN é suficiente.

De seguida, apresenta-se mais ao pormenor o problema da afetação dos guindastes e posicionamento dos navios no TN bem como algumas formulações matemáticas que possibilitam a resolução do mesmo.

3.4 Posicionamento dos navios e afetação dos guindastes no TN

3.4.1 Navios entrados no TN

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento no número de navios entrados no TN. De facto, olhando para a Figura 3.2(a), entre 2012 e 2013 houve um aumento de 100 navios. Desde o início do ano de 2014 até ao fim do mês de agosto, já entraram 322 navios no TN atingindo assim a quantidade de navios entrados no TN no ano de 2013.

Na Figura 3.2(b) mostra-se a evolução mensal da entrada dos navios no TN para os últimos quatro anos. Verifica-se que a primeira metade do ano de 2014 confirma esta tendência de aumento, apresentando valores que superam os valores verificados nos meses homólogos dos anos anteriores, estabelecendo assim novos recordes (ver Apêndice A).

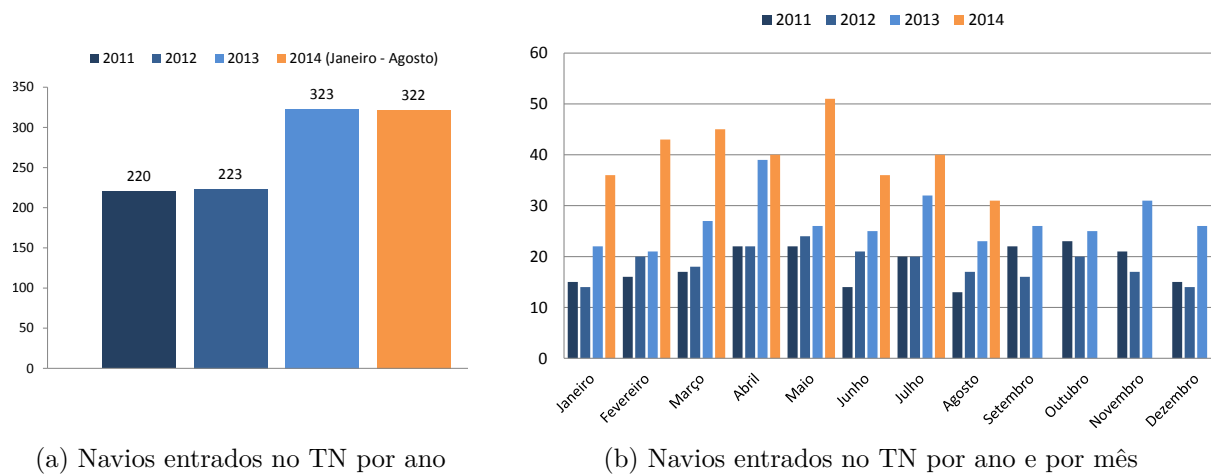


Figura 3.2: Gráficos - Navios entrados no TN

Não só o número de navios tem aumentado como também as suas dimensões (LOA e GT) e consequentemente a quantidade de mercadoria neles transportada, tal como se pode ver na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Dimensões médias dos navios e quantidades de mercadoria movimentadas nos últimos quatro anos no TN

	2011	2012	2013	2014 (até agosto)
LOA (média)	101,98	104,05	105,10	106,37
GT (média)	3.979,32	4.275,21	4.486,80	4.606,70
Mercadoria (toneladas)	1.070.407,11	1.195.783,60	1.689.316,03	1.470.173,89

O posicionamento dos navios em cais e a afetação dos guindastes aos mesmos têm, assim, de ser agilizados da melhor forma, de maneira a dar resposta ao constante aumento da procura dos serviços do TN. Tal facto, constitui uma motivação na escolha deste tema para o relatório de estágio.

3.4.2 Características e horários de funcionamento dos guindastes

Como já foi referido anteriormente, o TN, vocacionado para a movimentação de carga geral, dispõe de um cais de 900 metros de comprimento e de sete gruas de movimentação

vertical, os chamados guindastes.

Atualmente, os guindastes efetuam as operações de carga e descarga dos navios em regime diurno, apesar do porto trabalhar 24h/dia. Existem dois turnos de trabalho:

- 1º turno: 8h – 12h e 13h – 17h (8 horas de trabalho)
- 2º turno: 17h – 20h e 21h – 24h (6 horas de trabalho)

A empresa de estiva pode ainda requisitar um turno extra, noturno, das 00h às 7h, se tal for necessário.

Tal como na maior parte dos portos, os guindastes do TN andam sobre carris, não podendo trocar de posição/ordem e apresentam as seguintes características:

- existem seis guindastes elétricos. Quando o braço do guindaste está esticado até aos 20 metros a sua capacidade máxima é de 12 toneladas. Quando o alcance do seu braço está entre os 20 e 26 metros a sua capacidade máxima passa a ser de apenas 6 toneladas (ver Figura 3.3(a));
- existe ainda um guindaste elétrico com maior capacidade, também designado por guindaste polivalente. A sua capacidade máxima é de 35 toneladas. Este guindaste consegue movimentar-se pelos postos 4, 5 e 6, ou seja, aproximadamente, dos 350 metros de cais até aos 650 metros (ver Figura 3.3(b)).



(a) Guindaste elétrico - G.E.3



(b) Guindaste polivalente

Figura 3.3: Guindastes do TN

Existe ainda uma grua móvel privada, que permite à empresa de estiva Aveiport movimentar mais rapidamente mercadorias da sua responsabilidade. Ao usar a sua própria grua, a Aveiport tem um custo adicional por tonelada de mercadoria movimentada.

Sendo os guindastes propriedade do porto de Aveiro, as empresas de estiva que os utilizam têm custos aquando da sua utilização:

- os guindastes elétricos têm um custo fixo por cada hora de trabalho independentemente da capacidade carregada pelo guindaste;
- o caso do guindaste polivalente é um pouco diferente. De acordo com a capacidade utilizada do guindaste existem diferentes custos. Dessa forma, no setor da faturação, diferencia-se este guindaste da seguinte maneira: POLI15, POLI18, POLI25, POLI35 e POLI+35 aos quais estão associados custos diferentes. Assim, se o guindaste trabalhar com uma capacidade máxima inferior a 15 toneladas será aplicada uma determinada taxa por hora de trabalho. Se trabalhar com uma capacidade máxima entre as 15 e 18 toneladas, será aplicada uma taxa maior, e assim sucessivamente.

Ainda no que se refere aos guindastes, é importante indicar que estes têm taxas de processamento diferentes. Entende-se por taxa de processamento a quantidade média de mercadoria, em kg, que o equipamento consegue movimentar numa hora de trabalho. Como os seis guindastes elétricos apresentam as mesmas características, considera-se que têm a mesma taxa de processamento, conseguindo movimentar 263.644 kg/h. Por sua vez, o guindaste polivalente, que tem maior capacidade, consegue movimentar 319.001 kg de mercadoria por hora de trabalho. Estas taxas foram obtidas realizando, para tal, um pequeno estudo do histórico das movimentações de mercadorias efetuadas no TN no ano de 2013.

As operações de acostagem e desacostagem dos navios são bastante lentas e perigosas e requerem um certo espaço físico para poder efetuar as manobras em segurança. Para tal, o CCOP tem vindo a aplicar distâncias de segurança de acordo com o tamanho do navio, as quais são apresentadas na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Distâncias de segurança entre navios aplicadas no TN

LOA do navio	Distância de segurança aplicada (% do LOA)
até 110m	25%
>110 m	30%

Relativamente aos guindastes, não são aplicadas distâncias de segurança fixas apesar de existir um particular cuidado quando vários guindastes se encontram próximos uns dos outros.

De 50 em 50 metros estão dispostas tomadas de ligação que permitem alimentar os guindastes. Cada guindaste tem uma extensão de cerca de 40/50 metros. Se o guindaste não alcançar o navio todo muda-se de tomada o que demora cerca de 1 minuto.

No Capítulo 4, relativo à formulação matemática do problema, não serão consideradas estas últimas duas características visto não terem peso no processo de tomada de decisão.

3.4.3 Situação atual da afetação dos guindastes e dos postos de acostagem

No TN, a política de atendimento dos navios segue o modelo FIFO (*First-In First-Out*). A ordem de entrada dos navios no terminal é definida pela ATA, que corresponde à hora efetiva de chegada do navio no porto (linha das 6 milhas). Assim, o primeiro navio a chegar às 6 milhas será o primeiro a entrar no terminal e terá prioridade no que diz respeito à afetação do posto e dos guindastes para começar a operar. Todavia, podem existir trocas na ordem dos navios por várias razões:

- a pedido do agente de navegação;
- indisponibilidade dos guindastes;
- falta de espaço no cais para o navio;
- indisponibilidade da mercadoria.

O posicionamento dos navios no cais e a afetação dos guindastes é feita pelo CCOP. À medida que os navios estão para entrar no TN, a empresa de estiva, responsável pela movimentação da mercadoria, faz o pedido de requisito do número de guindastes que pretende utilizar (ver Apêndice C). Por norma, os guindastes são atribuídos a um navio de maneira a que isso não impeça a operação dos restantes navios. Pretende-se sempre que todos os navios em cais estejam a operar, se tal for possível. Os guindastes são atribuídos aos navios e não ao tipo de carga, pois isso iria restringir muito a oferta de serviço do TN.

Diariamente, são efetuadas duas escalas de pessoal: uma para o 1º turno e outra para o 2º turno. De acordo com o negócio desenvolvido no TN torna-se difícil prever os acontecimentos com antecedência. Dessa forma, o CCOP é bastante flexível no que toca aos prazos de

disponibilização de informações. Apesar do 1º turno do dia começar às 8h, as empresas de estiva podem enviar os pedidos de requisitos de guindastes até às 7h. O mesmo acontece com o 2º turno: as empresas de estiva têm até às 16h para requisitar os equipamentos e o turno começa às 17h. É de salientar de que, existe comunicação constante entre o CCOP e as empresas de estiva, apesar de existir essa flexibilidade e de os pedidos ficarem registados oficialmente apenas uma hora antes do turno começar. Dessa forma, o CCOP tem uma ideia do movimento que irá existir no TN podendo assim começar a organizar as tarefas e o cais.

Na formulação matemática do problema, será considerado que o CCOP e as empresas de estiva trabalham e funcionam em conjunto.

Consoante as informações recebidas por parte das empresas de estiva e os requisitos de guindastes, o CCOP efetua as escalas nas quais constam as seguintes informações:

- o nome do operador de equipamento portuário;
- o nome do navio em questão;
- o operador ou empresa de estiva responsável pelo navio;
- o período de trabalho (08/17 ou 17/24 conforme o turno para o qual se está a realizar a escala);
- a mercadoria movimentada;
- a máquina afetada para a movimentação da carga;
- o local atribuído para o navio.

É com as escalas que as equipas de trabalho passam a conhecer as tarefas que serão da sua responsabilidade no turno em causa e é nelas que se vê com mais facilidade a afetação dos postos e dos guindastes (ver Apêndice B).

NOMES	NAVIOS	S.A	OPERADOR OU EMPRESA	
			AVEIPOINT	

PERÍODOS	MERCADORIA	MÁQUINAS	LOCAL	OBSERVAÇÕES
08/17	E/ PACOTAO DE CIMENTO	G. E. = 6	T. N. - 01	

Figura 3.4: Exemplo de escala

No exemplo acima apresentado (Figura 3.4), ao navio em questão foi atribuído o posto 1 (T.N. - 1) e o guindaste afetado a esse navio para a movimentação de pacotões de cimento foi o G.E.6, no 1º turno.

Nos documentos de requisitos e de escalas, a sigla G.E designa um dos guindastes elétricos com menor capacidade de carga e POLI designa o guindaste polivalente.

Atualmente, os guindastes são organizados no cais como é apresentado na Figura 3.5.

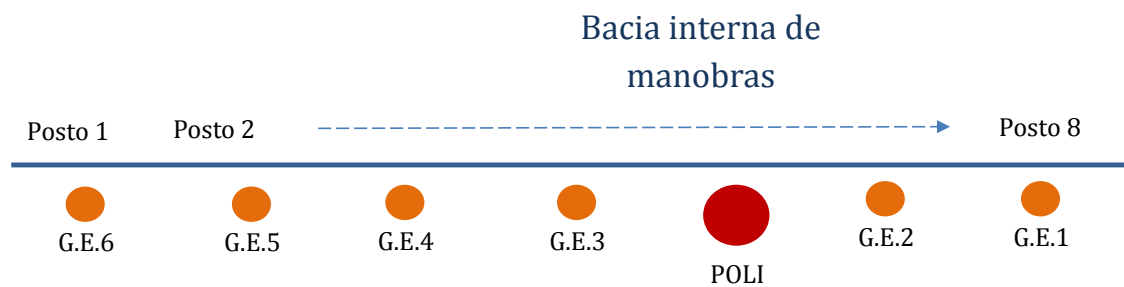


Figura 3.5: Disposição e designação dos guindastes

Os postos utilizados pelo CCOP na designação do local do navio são fictícios. Antigamente, o LOA médio dos navios rondava os 100 metros. Com um cais de 900 metros e tendo em conta as distâncias de segurança entre os navios, considerava-se que o cais tinha capacidade para oito navios, daí existirem oito postos. Hoje em dia, vistas as dimensões dos navios, o número de navios em cais já não é oito mas continua a usar-se essa notação de maneira a facilitar a designação do local dos navios.

3.4.4 Caracterização do problema

Em suma, o problema do posicionamento dos navios e da afetação dos guindastes pretende minimizar o tempo de estadia dos navios no cais. Este será tratado como sendo um problema comum ao CCOP e às empresas de estiva, considerando que elas funcionam como uma entidade única.

Na formulação do problema apresentada no Capítulo 4, serão considerados os sete guindastes de que dispõe o TN. De maneira a distinguir os guindastes elétricos com menos capacidade e o guindaste polivalente serão consideradas taxas médias de processamento diferentes. Lembra-se que os guindastes elétricos têm uma taxa de processamento de 263.644 kg/h e o guindaste polivalente movimenta 319.001 kg por hora de trabalho.

Os guindastes, movimentando-se sobre carris no cais com 900 metros de comprimento, não podem trocar de posições seguindo a disposição apresentada na Figura 3.5. O guindaste polivalente apenas pode ser movimentado a partir dos 350 metros de cais até aos 650 metros, restringido assim o intervalo de alcance dos outros guindastes.

Embora não exista uma restrição ditada pelo CCOP, no que diz respeito ao número de guindastes que podem operar num navio, a formulação do problema terá em conta uma restrição relativa ao número de guindastes não podendo operar mais do que três guindastes por período de tempo e por navio. É importante salientar que um guindaste apenas pode operar um navio de cada vez.

No que diz respeito ao espaço ocupado pelos navios, o cais será dividido em secções de 25 metros de maneira a facilitar a resolução do problema. Dessa forma, pretende-se conhecer a posição de início do navio, que irá ocupar um determinado número de secções de acordo com o seu LOA e a distância de segurança aplicada no seu caso.

No TN, prever os acontecimentos é bastante complicado, pois as informações chegam muito em cima da hora. Dessa forma, considera-se um horizonte temporal de três dias, o que corresponde a 42 horas de trabalho distribuídas pelos dois turnos de cada dia.

Note-se que, tendo em conta que se considera neste caso que o CCOP e as empresas de estiva funcionam como uma única entidade, não serão tidos em consideração os pedidos de requisitos dos guindastes efetuados, tentando sempre encontrar a melhor solução para ambos.

3.5 Revisão da bibliografia

Na literatura referente aos problemas de afetação de guindastes e de posicionamento de navios no cais encontram-se três tipos de problemas:

- o problema do posicionamento dos navios;
- o problema da afetação dos guindastes;
- o problema do posicionamento e da afetação dos guindastes, onde os dois problemas referidos acima são tratados simultaneamente.

É de salientar que na literatura, estes problemas são abordados em terminais de contentores onde a carga é sempre a mesma. Dessa forma, os tempos de processamento dos guindastes

são mais facilmente conhecidos e tratados. À semelhança do que acontece no TN, os guindastes de contentores funcionam sobre carris e não podem trocar de ordem.

Devido à diversidade de equipamentos portuários e às características dos cais e dos navios de hoje em dia, pesquisas recentes têm vindo a produzir muitos modelos de otimização para o planeamento de operações nos terminais de contentores. De maneira a proporcionar um suporte para essas referências, Bierwith e Meisel (2010) estudam a literatura relevante, desenvolvendo para tal esquemas de classificação dos problemas de afetação das posições do cais e dos guindastes aos navios, dos quais alguns serão referidos aqui.

No que toca ao posicionamento dos navios no cais, existe uma grande quantidade de restrições a ter em conta, o que leva à existência de uma grande variedade de modelos matemáticos diferentes para o mesmo problema. As restrições espaciais condicionam de facto a escolha da posição do navio no cais. De maneira a tornar essa escolha a melhor possível coloca-se a questão do tipo de cais que se considera aquando da formulação matemática do problema. Segundo Imai et al. (2005) distinguem-se os seguintes tipos de estrutura de cais:

- *Layout* discreto: o cais é dividido em postos nos quais apenas um navio pode ser operado de cada vez. Este tipo de cais tem a vantagem de facilitar o posicionamento dos navios mas na realidade não é totalmente eficiente.
- *Layout* contínuo: neste caso, o cais não é dividido, ou seja, os navios podem ocupar qualquer posição do cais. Assim, o problema torna-se mais complicado mas tem a vantagem de permitir encontrar soluções que ocupam melhor o espaço do cais.
- *Layout* híbrido: tal como para o caso discreto, o cais é dividido em postos mas grandes navios podem ocupar mais do que uma secção e pequenos navios podem partilhar um mesmo posto.

Tendo em conta a tendência verificada para o crescimento das dimensões dos navios de contentores e com o objetivo de possibilitar de maneira fácil e eficiente o posicionamento dos navios no cais, Imai et al. (2005) apresentam ainda uma heurística para o problema em causa no caso contínuo.

Lim (1998) também estuda o problema do posicionamento dos navios num cais contínuo. Pretende determinar a sua posição no cais considerando como função objetivo a de minimizar o comprimento máximo de cais usado pelos navios em qualquer período de tempo e

desenvolvendo para tal uma heurística. Assume que, uma vez que o navio está acostado, este não mudará de posição até sair e que os navios acostam assim que entram no terminal.

Por sua vez, o problema do posicionamento dos navios num cais discreto foi estudado por Imai et al. (2001). O estudo em causa assume a mesma profundidade ao longo do cais apesar de não acontecer sempre na realidade e navios podem chegar ao terminal enquanto operações de cais estão a decorrer. Procura-se o posicionamento dos navios no cais e o seu sequenciamento tendo como função objetivo a minimização dos tempos de espera e de processamento dos navios. Uma relaxação lagrangeana é apresentada para a resolução do problema.

O equipamento que mais tem impacto na carga e descarga dos contentores são os guindastes. Torna-se então interessante agilizar da melhor maneira o uso deste equipamento de maneira a dar resposta aos navios que dão entrada no terminal, aparecendo assim o problema de afetação dos guindastes. Na literatura referente a este tipo de problema é comum considerar-se vários tipos de tarefas relativamente à carga e descarga dos contentores de maneira a delimitar o trabalho de cada guindaste. Dessa forma, foi proposto, por Bierwieth e Meisel (2010) a seguinte divisão de tarefas:

- Áreas do navio: para este caso, uma tarefa consiste na operação total dos contentores numa determinada área do navio, que pode englobar várias secções do navio.
- Secções do navio: uma tarefa consiste na carga/descarga dos contentores numa secção do navio.
- Pilhas de contentores: uma tarefa consiste na carga/descarga de uma pilha de contentores.
- Grupos de contentores: uma tarefa refere-se a um grupo de contentores armazenados em zonas adjacentes e que têm, geralmente, um destino comum.
- Contentores: uma tarefa consiste na carga/descarga de um único contentor.

Devido aos diferentes tipos de tarefas que se podem considerar existe uma variedade de modelos matemáticos para os respetivos problemas.

Vários autores estudam o problema de afetação dos guindastes considerando secções dos navios:

- Lim et al. (2004) apresentam várias heurísticas para a resolução do problema considerando que os guindastes têm taxas de processamento diferentes e que existe uma

distância mínima entre os guindastes. Pretendem maximizar o rendimento total dos guindastes.

- Tendo como função objetivo a de minimizar o tempo de trabalho total, Guan et al. (2010) conseguem, de acordo com o tamanho do problema, obter uma solução exata ou soluções aproximadas obtidas a partir de uma relaxação lagrangeana ou de heurísticas.
- Por sua vez, Liu et al. (2005) minimizam o atraso máximo das saídas dos navios. Para tal, desenvolvem um modelo de programação linear inteira mista solucionado através de uma heurística no qual os navios já estão posicionados no cais e tendo em conta que os navios podem não estar disponíveis para as operações de carga e descarga ao mesmo tempo.

O problema de afetação dos guindastes considerando grupos de contentores foi introduzido por Kim e Park (2004). O objetivo do problema passa pela minimização da soma ponderada dos tempos de processamento dos navios e um método *Branch and Bound* (B&B) é proposto para a obtenção de uma solução ótima. De maneira a superar a dificuldade computacional do método B&B é apresentado um algoritmo de pesquisa heurística (pesquisa *Greedy*). Verifica-se ainda que o método B&B supera qualitativamente as soluções obtidas pelo método de *Greedy* usado mas falha para problemas de grande dimensão.

Geralmente, no dia a dia de um terminal, determina-se primeiro o posicionamento dos navios para depois repartir os guindastes disponíveis entre os navios que estão no cais simultaneamente. Tal sequenciamento pode ser determinado resolvendo o primeiro problema e usando o seu *output* como *input* para resolver o segundo problema. Por outro lado, podem-se também desenvolver modelos e métodos para resolver estes dois problemas simultaneamente.

O problema do posicionamento contínuo dos navios em simultâneo com a afetação dos guindastes aos mesmos foi introduzido por Park e Kim (2003). Um modelo de programação inteira é formulado e uma solução de duas fases é sugerida para a resolução do problema. A primeira fase determina a posição e a hora de acostagem dos navios bem como o número de guindastes afetos aos mesmos em cada período de tempo. Um horário de trabalho detalhado para cada guindaste é elaborado na segunda fase. Neste estudo, os tempos de processamento dos navios são independentes da sua posição no cais.

Por sua vez, Imai et al. (2008) aborda o mesmo tipo de problema apresentando uma formulação matemática do mesmo e utilizando um algoritmo genético para o resolver.

Capítulo 4

Modelos matemáticos para o problema

De maneira a minimizar o tempo de estadia dos navios no TN, elaboram-se de seguida vários modelos matemáticos que permitem obter o posicionamento dos navios no cais e a afetação dos guindastes aos mesmos tendo em conta as condições que necessitam de ser satisfeitas.

Note-se que aqui que a formulação matemática apresentada neste capítulo segue as ideias do modelo apresentado por Ak (2008) (ver secção 4.1) e que os restantes modelos e variantes são novos.

4.1 Referência bibliográfica base

À semelhança do que os autores apresentados na secção 3.5 fizeram ao tratarem o problema do posicionamento dos navios e da afetação dos guindastes simultaneamente, tenta-se aplicar o mesmo tipo de raciocínio para o caso do TN tendo como base a formulação apresentada por Ak (2008).

Para além desta formulação, Ak (2008) trata também os dois problemas separadamente. Para o posicionamento dos navios propõe formulações para cais com estrutura contínua e apresenta ainda um modelo para o problema da afetação dos guindastes aos navios acostados com o objetivo de otimizar o processo de carga e descarga dos contentores.

Com o modelo proposto para o problema do posicionamento dos navios no cais e da afetação dos guindastes, Ak (2008) pretende determinar a posição e a hora de acostagem bem como

a hora de saída dos navios. Simultaneamente, visa determinar os guindastes que irão operar em cada navio tendo como objetivo o de minimizar a soma dos tempos de espera e da penalização total dos atrasos dos navios. De maneira a simplificar o modelo, divide o cais em secções que correspondem aos compartimentos dos navios (3 ou 4 linhas de contentores). Neste estudo, tem-se como *input* um conjunto de guindastes idênticos que têm taxas de processamento para cada compartimento do navio conhecidas à partida e que circulam sobre carris não podendo trocar de posições. Tem-se ainda um conjunto de navios para os quais são conhecidas as horas de chegada. Vários guindastes podem trabalhar num mesmo navio mas apenas um equipamento pode operar num compartimento por período de tempo. Considera-se ainda que, tendo começado a operação de carga/descarga num compartimento, este não poderá ser parado até à finalização da operação.

Em suma, à semelhança de Ak (2008), a afetação dos postos e dos guindastes aos navios entrados no TN será tratado simultaneamente e depois resolvido separadamente de maneira a comparar a eficiência dos modelos e com a diferença de que a função objetivo considerada no presente relatório visa minimizar o tempo total de estadia dos navios no TN. Seguindo a mesma ideia de Ak (2008) ao considerar os navios como conjuntos de secções de 3 ou 4 linhas de contentores, o cais e os navios considerados no problema em causa serão divididos em secções de 25 metros. No que toca aos guindastes, tal como aqueles considerados na referência base, estes deslocam-se sobre carris e não podem trocar de ordem mas serão considerados guindastes com capacidades diferentes: seis guindastes com capacidade de 263.644 kg/h e outro com capacidade de 319.001 kg/h. Tal não acontece para os modelos desenvolvidos por Ak (2008) que considera um conjunto de guindastes idênticos para a modelação do problema, pois estes visam a movimentação de contentores.

4.2 Formulação matemática principal

Como já foi referido anteriormente, o CCOP e as empresas de estiva comunicam constantemente acerca do movimento que afetará o TN nos dias seguintes. Dessa forma o modelo a seguir apresentado será pensado assumindo a cooperação entre essas duas entidades.

Os conjuntos utilizados na formulação do problema são os seguintes:

$V \rightarrow$ conjunto de navios, $V = \{1, \dots, N\}$;

$T \rightarrow$ horizonte temporal, $T = \{1, \dots, M\}$;

$G \rightarrow$ conjunto de guindastes, $G = \{1, \dots, I\}$;

$B \rightarrow$ conjunto de divisões (de 25 metros) do cais, $B = \{1, \dots, J\}$.

Para efetuar a afetação dos postos e dos guindastes aos navios conhecem-se à partida os seguintes parâmetros:

a_k : hora de entrada do navio k no TN;

Q_k : volume de carga a operar no navio k ;

h_k : comprimento do navio (por unidades de cais);

p_g : taxa de processamento do guindaste g (por período de tempo);

i_g : início do intervalo de alcance no cais do guindaste g ;

f_g : fim do intervalo de alcance no cais do guindaste g ;

$F_t = 1$: folga dada no tempo para manobras dos navios (período de tempo);

$F_e = 2$: folga dada no espaço (unidades de cais).

A hora de entrada, a_k , e a quantidade de mercadoria a movimentar, Q_k , são conhecidas à partida por parte das empresas de estiva.

As taxas de processamento, p_g , resultam de um estudo das horas de trabalho dos guindastes do TN no ano de 2013. Dessa forma, os guindastes elétricos têm uma taxa de processamento de 263.644 kg/h e para o guindaste polivalente considera-se uma taxa de processamento igual a 319.001 kg/h.

Definem-se também, à partida, os parâmetros i_g e f_g que representam, respetivamente, o início e o fim do intervalo de alcance dos guindastes. Entende-se por intervalo de alcance a zona do cais pela qual os guindastes se podem mover. O guindaste polivalente apenas se pode movimentar dos 350 aos 650 metros. Dessa forma e como os guindastes não podem trocar de posições, os primeiros quatro guindastes (olhando para a Figura 3.5 da esquerda para a direita) têm o seu intervalo de alcance desde os 0 metros até aos 650 metros (fim do intervalo do guindaste polivalente) e os dois últimos guindastes desde os 350 metros até aos 900 metros. De maneira a obrigar a que o navio seja todo alcançável pelos guindastes que o estão a operar, o início do navio, b_k , e o fim do mesmo, $b_k + h_k$, estarão incluídos nesse intervalo, deixando-se no entanto uma folga no espaço ($F_e = 2$).

O cais do TN tem um comprimento de 900 metros. De maneira a diminuir a complexidade da formulação matemática e visto não existir muito rigor neste aspeto por parte do CCOP, optou-se por considerar um cais com estrutura discreta. Assim será dividido de 25 em 25

metros. Dessa forma, o comprimento dos navios também será dividido por secções de 25 metros.

Considera-se ainda uma folga de um período de tempo (F_t) de maneira a dar tempo aos navios para efetuarem as manobras de acostagem e desacostagem, e outra no espaço (F_e) de maneira a não restringir tanto o intervalo de alcance dos guindastes já que se considera um cais com estrutura discreta e que todos os navios terão as distâncias de segurança incluídas no parâmetro h_k .

Com o objetivo de minimizar o tempo de estadia dos navios no TN pretende-se determinar as seguintes variáveis:

b_k : posição de acostagem do navio k ;

t_k : hora de acostagem do navio k ;

c_k : hora de saída do navio k ;

$$x_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{se o navio } l \text{ atracar depois do navio } k \text{ sair} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{se o fim do navio } l \text{ estiver antes do início do navio } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$z_{gk}^j = \begin{cases} 1, & \text{se o guindaste } g \text{ operar no navio } k \text{ no período } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

De maneira a simplificar a compreensão das variáveis binárias x_{kl} e y_{kl} , apresenta-se de seguida um exemplo.

A Figura 4.1 esquematiza uma possível solução do problema considerando seis navios, doze períodos de tempo e oito secções de cais através de um diagrama tempo-espaco. É de notar que quaisquer dois navios não podem coincidir simultaneamente no tempo e no espaco, como se pode verificar no esquema.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1						1						
2		2									3	
3												
4							4					
5			5									
6												
7										6		
8												

Figura 4.1: Exemplo de solução
Adaptado de Ak (2008)

Analisemos as variáveis x e y para alguns casos. Os navios 2 e 5 acostam ao mesmo tempo, no período 1, pelo que $x_{25} = x_{52} = 0$. No que diz respeito à variável y , podemos ver que a posição de acostagem do navio 5 é depois da do navio 2 ($b_2 = 1$ e $b_5 = 4$), pelo que a variável $y_{52} = 1$. Olhando agora para os navios 3 e 5 podemos concluir que $x_{53} = 1$ e $y_{53} = 1$, pois o navio 3 atraca depois do navio 5 sair e o fim do navio 3 está antes do início do navio 5. O navio 4 acosta no período 6 nas secções 3, 4 e 5. Por sua vez, o navio 5 fica acostado em cais até ao período 5 ocupando as posições 4, 5, 6 e 7. Assim, $x_{54} = 1$ e $x_{45} = 0$, pois o navio 4 atraca depois do navio 5 sair, e as duas variáveis y associadas a estes navios tomam o valor 0.

Tendo em conta as características do funcionamento do TN apresentadas anteriormente nas secções 3.4.2 e 3.4.3, o problema em causa passa por considerar as seguintes restrições:

$$x_{lk} + x_{kl} + y_{lk} + y_{kl} \geq 1 \quad \forall k, l \in V \text{ e } k < l \quad (4.1)$$

$$x_{lk} + x_{kl} \leq 1 \quad \forall k, l \in V \text{ e } k < l \quad (4.2)$$

$$y_{lk} + y_{kl} \leq 1 \quad \forall k, l \in V \text{ e } k < l \quad (4.3)$$

$$t_l \geq c_k + F_t + (x_{kl} - 1)2M \quad \forall k, l \in V \text{ e } k \neq l \quad (4.4)$$

$$b_k \geq b_l + h_l + (y_{kl} - 1)J \quad \forall k, l \in V \text{ e } k \neq l \quad (4.5)$$

$$t_k \geq a_k \quad \forall k \in V \quad (4.6)$$

$$\sum_{k \in V} z_{gk}^j \leq 1 \quad \forall j \in T, \forall g \in G \quad (4.7)$$

$$t_k \leq j \cdot z_{gk}^j + (1 - z_{gk}^j)M \quad \forall j \in T, \forall k \in V, \forall g \in G \quad (4.8)$$

$$c_k \geq (j + 1)z_{gk}^j \quad \forall j \in T, \forall k \in V, \forall g \in G \quad (4.9)$$

$$\sum_{j \in T} \sum_{g \in G} p_g \cdot z_{gk}^j \geq Q_k \quad \forall k \in V \quad (4.10)$$

$$b_k + h_k \leq \min\{f_g + F_e, J\} \cdot z_{gk}^j + (1 - z_{gk}^j)J \quad \forall j \in T, \forall k \in V, \forall g \in G \quad (4.11)$$

$$b_k \geq \max\{i_g - F_e, 0\} \cdot z_{gk}^j \quad \forall j \in T, \forall k \in V, \forall g \in G \quad (4.12)$$

$$z_{gk}^j + z_{g'l}^j \leq 2 - y_{kl} \quad \forall j \in T, \forall k, l \in V, \forall g, g' \in G, g' < g \quad (4.13)$$

$$b_k \leq J - h_k \quad \forall k \in V \quad (4.14)$$

$$b_k \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall k \in V \quad (4.15)$$

$$x_{kl} \in \{0, 1\}, \quad y_{kl} \in \{0, 1\} \quad \forall k, l \in V \text{ e } k \neq l \quad (4.16)$$

$$z_{gk}^j \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V, \forall g \in G, \forall j \in T \quad (4.17)$$

Considerando os *inputs* apresentados e as restrições do problema pretende-se minimizar o tempo de estadia dos navios no cais através da seguinte função objetivo:

$$\sum_{k \in V} c_k - a_k \quad (4.18)$$

As restrições (4.1), (4.2) e (4.3) permitem evitar a sobreposição dos navios no tempo ou no espaço. As restrições (4.2) e (4.3) garantem que, para cada variável x e y , apenas um dos casos é possível. De facto, se o navio k acostar depois do navio l sair ($x_{lk} = 1$), o contrário não pode acontecer e x_{kl} tem obrigatoriamente de ser igual a 0. O mesmo acontece para a variável y : se $y_{lk} = 1$, ou seja, se o fim do navio k estiver antes do início do navio l , y_{kl} não pode ser simultaneamente igual a 1. Por sua vez, a restrição (4.1) garante que pelo menos uma das variáveis x ou y seja igual a 1, isto é, que os navios têm, obrigatoriamente, de se seguirem no tempo ou no espaço. As restrições (4.4) e (4.5) asseguram que os tempos e as posições de acostagem dos navios são consistentes com a definição das variáveis x_{kl} e y_{kl} respetivamente, onde M representa o período máximo considerado nesse problema e J o fim do cais. Assim, se o navio l atracar depois do navio k sair, a sua hora de acostagem será no período a seguir à hora de saída no navio k . Deixa-se aqui uma folga de um período de tempo (F_t) para efetuar as manobras de acostagem e desacostagem. Com a restrição (4.5) garante-se que a posição do navio k seja depois do fim do navio l , $b_l + h_l$ quando $y_{kl} = 1$. A restrição (4.6) obriga a que a hora de acostagem de um navio ocorra depois da sua chegada no terminal. O facto de que um guindaste só pode operar num único navio em cada período de tempo é garantido pela restrição (4.7). A restrição (4.8) assegura que a

hora de acostagem de um navio seja antes do início do trabalho de qualquer guindaste que o opera. Por sua vez, a restrição (4.9) fixa a hora de saída do navio que deverá ser no fim do trabalho de todos os guindastes que o operaram. Dessa forma, se a grua g trabalhar no navio k no período j ($z_{gk}^j = 1$), o navio só poderá sair depois do tempo $j + 1$, ou seja, no fim do trabalho do guindaste. A restrição (4.10) garante que a capacidade de movimentação dos guindastes em cada período de tempo permita a movimentação da carga (Q_k) do navio k . É ainda necessário garantir que o navio seja todo atingível pelos guindastes que o estão a operar o que é assegurado pelas restrições (4.11) e (4.12). Assim, obriga-se a que o navio k esteja no intervalo de alcance do guindaste g , ou seja b_k e $b_k + h_k$ têm de estar no intervalo $[i_g, f_g]$. Deixa-se aqui uma folga no espaço ($F_e = 2$) de maneira a não restringir tanto o alcance dos guindastes já que se considera um cais com estrutura discreta e que todos os navios terão as distâncias de segurança incluídas no seu comprimento, h_k . É ainda necessário garantir que os guindastes não troquem de posições.

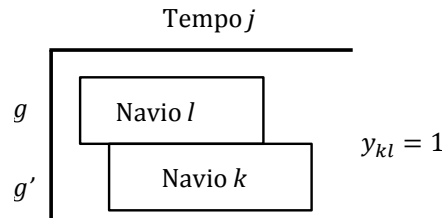


Figura 4.2: Esquema - Explicação da restrição (4.13)

Dessa forma, olhando para a restrição (4.13), quando $y_{kl} = 1$, se a grua g' , com $g' > g$, opera no navio l (que está acima do navio k), o guindaste g não poderá operar no navio k . Da mesma forma, se o guindaste g trabalha no navio k , g' não poderá operar no navio l (ver Figura 4.2). As restrições (4.14) e (4.15) condicionam a variável relativa à posição de acostagem do navio k . De facto $b_k \in [0, J - h_k]$, onde J é o comprimento do cais em divisões de 25 metros e h_k é o número de divisões de 25 metros do navio. Por fim, as restrições (4.16) e (4.17) restringem o domínio das variáveis binárias em causa.

4.3 Variantes da formulação matemática principal

4.3.1 Restrições de Tempo (RT)

As restrições (4.4) e (4.8) da formulação matemática principal estão relacionadas com as variáveis de tempo do problema: t_k , c_k , x_{kl} e z_{gk}^j .

A restrição (4.4) assegura que o tempo de acostagem está de acordo com a definição da variável x_{kl} obrigando a que a hora de acostagem do navio l seja no período a seguir à hora de saída do navio k , se o navio l atracar depois do navio k sair ($x_{kl} = 1$).

Se $x_{kl} = 0$, ou seja, se o navio l não atracar depois da saída do navio k a restrição fica da seguinte maneira:

$$t_l \geq c_k + F_t - 2M$$

e esta será sempre respeitada já que $2M$ será sempre maior do que $c_k + F_t$

Por sua vez, a restrição (4.8) assegura que a hora de acostagem de um navio seja antes do início do trabalho de qualquer guindaste que o opera ($t_k \geq j \cdot z_{gk}^j$ quando $z_{gk}^j = 1$). Se $z_{gk}^j = 0$, ou seja, se o guindaste g não operar no navio k no período j fica-se com a restrição

$$t_k \leq M$$

que será sempre verificada.

Este tipo de restrições têm a desvantagem de fazer com que o valor do limite inferior inicial obtido com a relaxação linear seja bastante pequeno, aumentando dessa forma o tempo de obtenção da solução ótima pelo método de *Branch and Bound*. De maneira a evitar esta situação, criam-se as seguintes variáveis:

$$v_k^j = \begin{cases} 1, & \text{se o navio } k \text{ começa a ser operado no período } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$u_k^j = \begin{cases} 1, & \text{se o navio } k \text{ está a ser operado no período } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

As restrições a seguir apresentadas passam a substituir as restrições (4.4) e (4.8).

$$t_k = \sum_{j \in T} j \cdot v_k^j \quad \forall k \in V \quad (4.19)$$

$$c_k \geq (j+1)u_k^j \quad \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.20)$$

$$z_{gk}^j \leq u_k^j \quad \forall k \in V, \forall j \in T, \forall g \in G \quad (4.21)$$

$$u_k^j = 0 \quad \forall k \in V, \forall j \in T \text{ e } j < a_k \quad (4.22)$$

$$\sum_{j \in T} v_k^j = 1 \quad \forall k \in V \quad (4.23)$$

$$v_k^j \geq u_k^j - u_k^{j-1} \quad \forall k \in V, \forall j \in T \text{ e } j > 1 \quad (4.24)$$

$$v_k^1 \geq u_k^1 \quad \forall k \in V \quad (4.25)$$

$$v_k^j \leq u_k^j \quad \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.26)$$

$$v_k^j \leq 1 - u_k^{j-1} \quad \forall k \in V, \forall j \in T \text{ e } j > 1 \quad (4.27)$$

$$x_{kl} + u_k^s + v_l^j \leq 2 \quad \forall k, l \in V \text{ e } k \neq l, \forall j, s \in T \text{ e } s \geq j - F_t \quad (4.28)$$

$$u_k^j \in \{0, 1\}, \quad v_k^j \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V, j \in T \quad (4.29)$$

A hora de acostagem t_k do navio k tem de ser no início da operação do mesmo o que é assegurado pela restrição (4.19). Se o navio k está a operar no período j , ou seja, se $u_k^j = 1$ então a saída do mesmo terá de ser pelo menos no período a seguir, $j + 1$. Esta condição é satisfeita pela restrição (4.20). A restrição (4.21) permite relacionar as variáveis z_{gk}^j e u_k^j . De facto, se $u_k^j = 0$, a variável z_{gk}^j não poderá tomar o valor 1 já que o navio k não está a ser operado no período j . A restrição (4.22) obriga a que a variável u_k^j tome o valor 0 quando o período j antecede a hora de acostagem do navio k , a_k . A variável v_k^j toma o valor 1 se o navio k começa a operar no período j . Assim sendo, a restrição (4.23) assegura que o início da operação no navio k aconteça apenas uma vez. A restrição (4.24) garante que se o guindaste trabalhar no período j no navio k e não tiver começado a operação nesse mesmo período então a operação teria de já estar a decorrer no período anterior e $u_k^{j-1} = 1$. A restrição (4.25) obriga a que a variável u_k^1 não seja igual a 1 se o trabalho não tiver sido iniciado nesse mesmo período. À semelhança da última condição, a restrição (4.26) garante que se a operação começa no período j para o navio k então $u_k^j = 1$. A restrição (4.27) relaciona as variáveis u_k^j e v_k^j : se o navio k começa a operar no período j não pode ter estado a operar no período $j - 1$, pelo que u_k^{j-1} terá de ser igual a 0. A restrição (4.28) assegura que se o navio l atraca depois do navio k sair então u_k^s e v_l^j não podem tomar o valor 1 simultaneamente. Relembra-se aqui que se dá uma tolerância de um período de tempo (F_t) para as manobras de acostagem e desacostagem dos navios no cais, daí essa última restrição considerar apenas os casos em que $s \geq j - F_t$, com $s, j \in T$. Por último, a restrição (4.29) garante que o domínio das variáveis binárias u_k^j e v_k^j seja respeitado.

4.3.2 Restrições do Cais (RC)

Relativamente ao espaço, a restrição (4.5) da formulação matemática principal também traz a desvantagem de originar limites inferiores para o valor ótimo da solução muito fracos.

A restrição (4.5) garante que a posição de acostagem dos navios está consistente com a definição da variável y_{kl} . De facto, assegura que a posição de acostagem do navio k seja depois do navio l , $b_l + h_l$, quando $y_{kl} = 1$.

Se $y_{kl} = 0$, a restrição em causa fica da seguinte forma:

$$b_k \geq b_l + h_l - J$$

Esta restrição não deixa de ser respeitada já que J é sempre maior do que $b_l + h_l$.

À semelhança do que acontece para as restrições relativas ao tempo e de maneira a evitar um limite inferior baixo, as variáveis m_k^n e d_k^n são criadas:

$$m_k^n = \begin{cases} 1, & \text{se a primeira posição ocupada pelo navio } k \text{ é a } n \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$d_k^n = \begin{cases} 1, & \text{se o navio } k \text{ ocupa a posição } n \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A restrição (4.5) fica dessa forma substituída pelo seguinte conjunto de restrições:

$$b_k = \sum_{n \in B} n \cdot m_k^n \quad \forall k \in V \quad (4.30)$$

$$\sum_{n \in B} d_k^n = h_k \quad \forall k \in V \quad (4.31)$$

$$\sum_{n \in B} m_k^n = 1 \quad \forall k \in V \quad (4.32)$$

$$m_k^n \geq d_k^n + d_k^{n-1} \quad \forall k \in V, \forall n \in B \text{ e } n > 0 \quad (4.33)$$

$$m_k^0 \geq d_k^0 \quad \forall k \in V \quad (4.34)$$

$$m_k^n \leq d_k^n \quad \forall k \in V, \forall n \in B \quad (4.35)$$

$$m_k^n \leq 1 - d_k^{n-1} \quad \forall k \in V, \forall n \in B \text{ e } n > 0 \quad (4.36)$$

$$y_{kl} + \sum_{n=\max\{q-h_l+1,0\}}^J m_l^n + m_k^q \leq 2 \quad \forall k, l \in V \text{ e } k \neq l, \forall q \in B \quad (4.37)$$

$$m_k^n \in \{0, 1\}, \quad d_k^n \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V, \forall n \in B \quad (4.38)$$

A restrição (4.30) relaciona as variáveis b_k e m_k^n , assegurando que a posição do navio k seja a n definida pela variável m_k^n . A restrição (4.31) obriga a que o número de variáveis d_k^n iguais a 1 seja igual ao número de secções do navio k definido pelo parâmetro h_k . Por sua vez, a restrição (4.32) obriga a que apenas uma variável m_k^n seja igual a 1 assegurando que a primeira posição ocupada pelo navio k seja única. As restrições (4.33) a (4.36) relacionam as variáveis m_k^n e d_k^n . A restrição (4.33) garante que se o navio k ocupar a posição n e essa não for a sua posição inicial então a posição $n - 1$ também terá de ser ocupada por ele. A restrição (4.34) define as variáveis m_k^n e d_k^n para o início do cais sendo que d_k^0 tem de ser igual a 0 se a posição inicial do navio k não seja no início do cais. A restrição (4.35) assegura que se n é a posição inicial do navio k então $d_k^n = 1$. Se a posição inicial do navio k é n então a posição $n - 1$ não poderá ser ocupada por ele, pelo que d_k^{n-1} terá de ser igual a 0, o que é assegurado pela restrição (4.36). A restrição (4.37) assegura que apenas um dos casos seja aceite: ou $m_l^n = 1$ ou $m_k^q = 1$ quando os navios são seguidos e se pretende colocá-los no intervalo $[n, q]$.

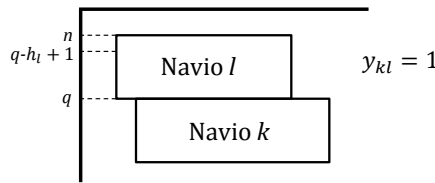


Figura 4.3: Esquema - Explicação da restrição (4.37)

Não podendo existir sobreposição de navios no espaço, se a primeira posição do navio k for a q então a primeira posição do navio l não poderá estar no intervalo $[q - h_l + 1, q]$, pois o navio l tem comprimento $n + h_l$, onde n é a primeira posição do navio l (ver Figura 4.3). Por fim, a restrição (4.38) garante que as variáveis m_k^n e d_k^n são binárias.

Note-se, aqui, que a restrição (4.11) não é substituída já que esta assegura que o fim do

navio k esteja contido no intervalo de alcance dos guindastes que o operam. Tal condição não está tido em consideração no conjunto de restrições apresentadas nesta secção.

4.3.3 Restrições de Tempo e do Cais (RTC)

Outra alternativa passa por considerar as RT e RC simultaneamente. Dessa forma, procura-se analisar a eficiência das várias formulações relativamente ao tempo que cada uma demora na obtenção da solução ótima bem como os limites inferiores e superiores obtidos.

4.4 Restrição no número de guindastes

Nas formulações apresentadas anteriormente não se considera nenhuma restrição relativamente ao número de guindastes que podem operar nos navios em cais. Dessa forma, espera-se que os esquemas de solução obtidos para estas formulações sejam bastante simples, afetando sempre o maior número possível de guindastes e consequentemente demorando pouco tempo na operação dos navios. Será de esperar que os sete guindastes do TN possam operar todos ao mesmo tempo num mesmo navio, tendo em conta que um guindaste pode trabalhar num único navio por período de tempo.

Com o objetivo de evitar este tipo de situações, pouco realistas para o TN, pode-se acrescentar a seguinte restrição:

$$\sum_{g \in G} z_{gk}^j \leq 3 \quad \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.39)$$

Acrescentando esta restrição nos modelos, passa-se a considerar que, no máximo, apenas três guindastes podem operar por período de tempo e por navio. Dessa forma, é de esperar que o tempo de estadia dos navios no TN seja maior, comparado com o valor obtido quando não se considera esta restrição. Por outro lado, permite a apresentação de uma solução mais realista para o CCOP que, de acordo com os pedidos realizados pelas empresas de estiva, costuma ter um ou dois guindastes a operar por navio.

4.5 Decomposição do problema

Outra maneira de resolver o problema em causa neste trabalho passa por separá-lo e resolvê-lo em duas etapas em que a primeira coloca os navios pelo cais e determina as horas de

início das operações. Numa segunda fase, depois de conhecidas as posições de acostagem e as horas de início de trabalho dos navios, procura-se afetar os guindastes aos mesmos.

As variáveis e os parâmetros considerados neste novo modelo são os mesmos que os da formulação matemática principal com a variante das RT com a diferença de que apenas se consideram que existem dois tipos de guindastes em que $p_1 = 263.644$ kg/h e $p_2 = 319.001$ kg/h. Nesta fase do modelo não se procura saber que guindastes vão efetivamente operar nos navios, apenas se pretende conhecer a posição dos navios e estimar o seu tempo de estadia no cais.

A variável z_{rk}^j , com $r = 1$ ou $r = 2$, passa a ter o seguinte significado:

z_{rk}^j : número de guindastes do tipo r que operam o navio k no período j .

Note-se aqui que os guindastes do tipo $r = 1$ representam os guindastes elétricos com menor capacidade e o tipo $r = 2$ refere-se ao guindaste polivalente.

O objetivo neste modelo continua a ser o de minimizar o tempo de estadia dos navios, ou seja, a função objetivo continua a ser a (4.18).

Com o objetivo de obter a disposição dos navios na cais, passa-se a considerar o seguinte conjunto de restrições:

- restrições (4.1) a (4.3) da formulação matemática principal que visam evitar a sobreposição dos navios no tempo ou no espaço;
- restrição (4.5) que assegura que as posições de acostagem dos navios é consistente com a definição da variável y_{kl} ;
- restrição (4.6) que obriga a que a hora de acostagem de um navio seja depois da sua chegada no TN;
- restrições (4.14) e (4.15) que asseguram que a posição de acostagem dos navios sejam bem definidas de acordo com as características do cais;
- restrição (4.16) que assegura que o domínio das variáveis binárias x_{kl} e y_{kl} seja respeitado.

Consideram-se ainda as restrições da variante RT (restrições (4.19) a (4.29)) com a diferença de que a restrição (4.21) fica substituída pelas seguintes restrições:

$$z_{2k}^j \leq u_k^j \quad \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.40)$$

$$z_{1k}^j + z_{2k}^j \leq 3 * u_k^j \quad \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.41)$$

A restrição (4.40) garante que a operação do guindaste polivalente não pode estar a decorrer no período j se $u_k^j = 0$. Por sua vez, a restrição (4.41) assegura que num período existirão, no máximo, três guindastes a operar num navio.

Nesta fase, pretende-se apenas conhecer as posições dos navios no cais minimizando para tal o tempo de estadia dos navios. O tempo de estadia dos navios será dessa forma estimado, de acordo com o número de guindastes que o estarão a operar. É então necessário considerar ainda estas duas restrições:

$$\sum_{k \in V} z_{1k}^j \leq 6 \quad \forall j \in T \quad (4.42)$$

$$\sum_{k \in V} z_{2k}^j \leq 1 \quad \forall j \in T \quad (4.43)$$

Estas restrições limitam o número de guindastes que podem operar por período. No TN existem seis guindastes elétricos e um guindaste polivalente. Esta característica do TN é aqui respeitada com as restrições (4.42) e (4.43).

Relativamente ao domínio da variável z_{rk}^j , esta passa a ser inteira quando se considera o tipo de guindaste $r = 1$ e binária quando estamos perante o guindaste do tipo $r = 2$, passando a significar que o guindaste polivalente opera no navio k no período j se for igual a 1.

Relembra-se que o objetivo nesta fase passa por obter a disposição dos navios para os quais são utilizadas estimativas para o seu tempo de estadia no TN. Tendo em conta que não são consideradas nenhuma restrições relativa aos intervalos de alcance dos guindastes, qualquer guindaste pode operar qualquer navio e em qualquer posição do cais. Dessa forma, e não restringindo mais o número de guindastes que podem operar por navio, as estimativas obtidas para os tempos de estadia dos navios serão demasiado boas e poderá existir conflito entre navios no espaço aquando da afetação dos guindastes. De maneira a evitar este tipo de situações, optou-se por acrescentar a seguinte restrição:

$$z_{1k}^j \leq 1 \quad \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.44)$$

A restrição (4.44) limita o número de guindastes do tipo $r = 1$ que podem operar por navio e por período de tempo a 1, obtendo dessa forma uma estimativa não tão boa para o tempo de estadia dos navios mas evitando os conflitos entre navios no espaço. Na segunda

fase, o tempo de estadia dos navios e consequentemente do valor ótimo da solução poderão ser melhorados.

Note-se aqui que, considerando a restrição (4.44), a restrição (4.41) deixa de ser relevante.

Desta primeira fase, resultam os valores para as variáveis b_k , x_{kl} , y_{kl} e v_k^j os quais passam a ser considerados como *inputs* na segunda fase que visa obter a afetação dos guindastes aos navios já colocados no cais. Esta segunda fase será resolvida usando estes parâmetros no programa criado com a variante RT.

Espera-se com esta decomposição do problema obter uma solução mais rapidamente já que apenas será necessário efetuar a afetação dos guindastes depois de conhecidas as posições e horas de início das operações dos navios. Por outro lado, espera-se uma solução afastada da solução ótima encontrada com a formulação matemática principal e as suas variantes, já que os navios poderão ser colocados fora do intervalo de alcance do guindaste polivalente e dessa forma demorar mais tempo do que o inicialmente estimado.

4.6 Minimização das trocas de guindastes

Nas formulações apresentadas até à presente secção não se considera nenhuma restrição relativamente à organização dos guindastes pelos navios durante a sua operação.

O CCOP tem por hábito colocar um ou dois guindastes a operar por navio de acordo com os pedidos efetuados pelas empresas de estiva. Esses mesmos guindastes costumam ficar a operar no navio até à sua saída a não ser que outro navio precise da operação de um dos guindastes.

Dessa forma, e de maneira a evitar que haja um número elevado de trocas de guindastes num mesmo navio, passa-se a considerar a seguinte variável:

$$w_{gk}^j = \begin{cases} 1, & \text{se o guindaste } g \text{ começa a operar no navio } k \text{ no período } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O objetivo, neste caso, passa por minimizar o número de trocas dos guindastes. Por outras palavras, pretende-se minimizar o número de vezes que um guindaste começa a operar num navio, ou seja, pretende-se minimizar o número de variáveis w_{gk}^j iguais a 1. Dessa forma,

considera-se a seguinte função objetivo:

$$\min \sum_{g \in G} \sum_{k \in V} \sum_{j \in T} w_{gk}^j \quad (4.45)$$

Depois de obter os valores das variáveis b_k , t_k e c_k a partir de uma das formulações anteriores passa-se a considerá-los como parâmetros aquando da minimização das trocas de guindastes que tem em conta as seguintes restrições:

$$z_{gk}^j - z_{gk}^{j-1} \leq w_{gk}^j \quad \forall g \in G, \forall k \in V, \forall j \in T \text{ e } j > 1 \quad (4.46)$$

$$w_{gk}^j \leq z_{gk}^j \quad \forall g \in G, \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.47)$$

$$w_{gk}^j \leq 1 - z_{gk}^{j-1} \quad \forall g \in G, \forall k \in V, \forall j \in T \text{ e } j > 1 \quad (4.48)$$

$$w_{gk}^j \in \{0, 1\} \quad \forall g \in G, \forall k \in V, \forall j \in T \quad (4.49)$$

A restrição (4.46) obriga a que, se o guindaste g não opera no navio k no período $j - 1$ e não começou a operação no período j então a variável z_{gk}^j não pode ser igual a 1. A restrição (4.47) relaciona as variáveis z_{gk}^j e w_{gk}^j garantindo que, se o guindaste g começar a operar o navio k no período j , então z_{gk}^j será obrigatoriamente igual a 1. A restrição (4.48) assegura que se o guindaste g começar a operar no período j então não pode ter estado a operar no período j e $z_{gk}^{j-1} = 0$. Por último, a restrição (4.49) refere-se ao domínio da variável w_{gk}^j que apenas pode tomar os valores 0 e 1.

Considerando este conjunto de restrições espera-se obter uma solução mais realista e viável para o CCOP e as configurações do TN.

Capítulo 5

Apresentação dos resultados obtidos

As formulações matemáticas apresentadas no Capítulo 4 são compostas por uma quantidade bastante elevada de variáveis e restrições pelo que os programas criados usando o *Xpress-Optimizer* demoram algum tempo na obtenção das soluções para alguns exemplos. Dessa forma, os resultados apresentados neste capítulo são os obtidos depois de uma hora de execução (no máximo). Os resultados foram obtidos utilizando um computador portátil com processador Intel Core i3 M330 @2.13GHz, 4GB de memória RAM e sistema operativo 64bits, e a versão 25.01.05 do *Xpress-Optimizer*.

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos para quatro exemplos, os quais são inspirados de situações reais do TN. O horizonte temporal considerado para os exemplos foi sempre o mesmo correspondendo a três dias de trabalho.

Os exemplos usados são apresentados no Apêndice D. Dado o movimento que o TN tem vindo a conhecer optou-se por usar quatro exemplos diferentes sendo que o primeiro corresponde a uma situação de pouco movimento (com cinco navios entrados em três dias) e o quarto exemplo já retrata uma situação com mais algum movimento (com oito navios considerados). Em todos os exemplos, associa-se a cada navio entrado a sua hora de chegada (expressa em períodos de tempo), a quantidade de mercadoria (em kg) que vai ser movimentada e o seu comprimento (h_k) que já inclui as distâncias de segurança aplicadas de acordo com o tamanho do navio (ver Tabela 3.3). No conjunto de dados do exemplo 1, o navio 2 chega no período 10, o qual corresponde às 17h do primeiro dia de trabalho, para movimentar 3.985.914 kg de mercadoria e o seu comprimento corresponde a 5 secções de cais o que equivale a cerca de 125 metros (já com as distâncias de segurança incluídas).

Para a resolução do problema, tem-se ainda em consideração como parâmetros as taxas de

processamento dos guindastes bem como o seu intervalo de alcance. As taxas de processamento dos guindastes têm um papel fundamental para a definição do tempo de estadia dos navios no cais de acordo com a quantidade de mercadoria associada aos mesmos. O guindaste polivalente tem a taxa de processamento mais elevada no TN com cerca de 319.001 kg de mercadoria movimentada por hora e considera-se que os outros guindastes operam cerca de 263.644 kg/h. Por sua vez, os intervalos de alcance dos guindastes permitem definir a área do cais pela qual os guindastes se podem movimentar. Como já foi referido anteriormente, o guindaste polivalente apenas se pode movimentar dos 350 aos 650 metros o que corresponde ao intervalo definido pelas secções 14 a 26 do cais. Dessa forma, os restantes guindastes também veem o seu intervalo de alcance reduzido, tal como consta no Apêndice D.

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos para a formulação matemática principal e as suas variantes, tendo em conta ou não a restrição do número de guindastes. Tenta-se ainda minimizar as trocas de guindastes para um exemplo e apresenta-se o resultado obtido para o mesmo aplicando a decomposição do problema.

5.1 Resultados obtidos usando a formulação matemática principal e as suas variantes

O **primeiro exemplo**, cujo conjunto de dados está presente no Apêndice D, refere-se a uma situação de pouco movimento no TN com cinco navios entrados em três dias. Olhando para as horas de chegada dos navios verifica-se que os navios 2 e 3 chegam em períodos de tempo próximos pelo que é de esperar que estes sejam operados em simultâneo. Os restantes navios chegam em períodos de tempo mais distantes uns dos outros pelo que espera-se que os programas consigam operar os navios antes da chegada dos outros, não existindo dessa forma conflito no tempo nem no espaço para esses casos.

Na Tabela 5.1, apresentam-se os resultados obtidos para o primeiro exemplo. Nesta tabela constam os valores relativos ao tempo de execução dos programas, ao valor ótimo e aos limites inferior e superior da solução. A coluna “Tempo” refere-se ao tempo de execução, em segundos, até à obtenção da solução ótima ou até ser atingido o tempo limite de execução pré-estabelecido (uma hora). A coluna “Valor ótimo” apresenta o número de horas de estadia dos navios no cais para a solução ótima, sendo apresentado o sinal “-” quando não é possível encontrar a solução ótima no tempo limite. Nas colunas “Limite inferior” e

“Limite superior” constam os valores obtidos para os limites obtidos para a solução ótima e calculados ao longo do processo de procura da solução pelo método de *Branch and Bound*.

Tabela 5.1: Resultados obtidos para o exemplo 1

SEM restrição no nº de guindastea		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	1294	13	13	13
	Usando RT	30	13	13	13
	Usando RC	665	13	13	13
	Usando RTC	25	13	13	13

COM restrição no nº de guindastea		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	3600	-	-10	25
	Usando RT	18	25	25	25
	Usando RC	3601	-	11	25
	Usando RTC	15	25	25	25

Para o caso em que não se considera a restrição no número de guindastes, o valor da solução ótima é 13 horas. Como todos os guindastes podem operar num mesmo navio, o tempo de estadia dos navios vê-se bastante reduzindo (em média um navio fica em cais 2,6 horas) estando apenas os navios 2 e 3 operados simultaneamente, tal como se esperava. Já para o caso em que se considera que apenas três guindastes podem operar por período de tempo e por navio, o valor da solução ótima sobe para 25 horas.

Na Figura 5.1 apresenta-se o esquema da solução obtida para o caso em que se usa as RT e considerando a restrição do número de guindastes. Nele pode-se verificar que mal chegam ao TN os navios são posicionados no cais e começam a ser operados.

Pode-se ainda verificar que as restrições (4.1) a (4.3) da formulação matemática principal que evitam a sobreposição dos navios no tempo ou no espaço são satisfeitas.

Olhemos para o caso dos navios 2 e 3. Correndo o programa que usa as RT obtém-se que $y_{23} = 1$, $x_{23} = 0$ e $x_{32} = 0$. Comprova-se no esquema que, de facto, o fim do navio 3 está antes do início do navio 2, daí y_{23} ser igual a 1. O navio 2 é operado do período 10 ao período 15 e o navio 3 fica em cais desde o período 11 até ao 16, ou seja, estes dois navios

são operados simultaneamente obrigando a que as duas variáveis x associadas a eles sejam iguais a 0.

Já para o caso dos navios 4 e 5, verifica-se que o navio 5 atraca, no período 42, depois do navio 4 sair (no período 31), pelo que $x_{45} = 1$ mas $x_{54} = 0$. Neste caso, as variáveis y_{45} e y_{54} são iguais a 0 já que de acordo com a restrição (4.1), basta que uma das variáveis x ou y seja igual a 1 para que estas sejam satisfeitas. Se o navio 4 estivesse na posição 2, teria-se que $y_{54} = 1$ e $x_{45} = 1$ e, dessa forma, as restrições em causa continuariam a ser satisfeitas.

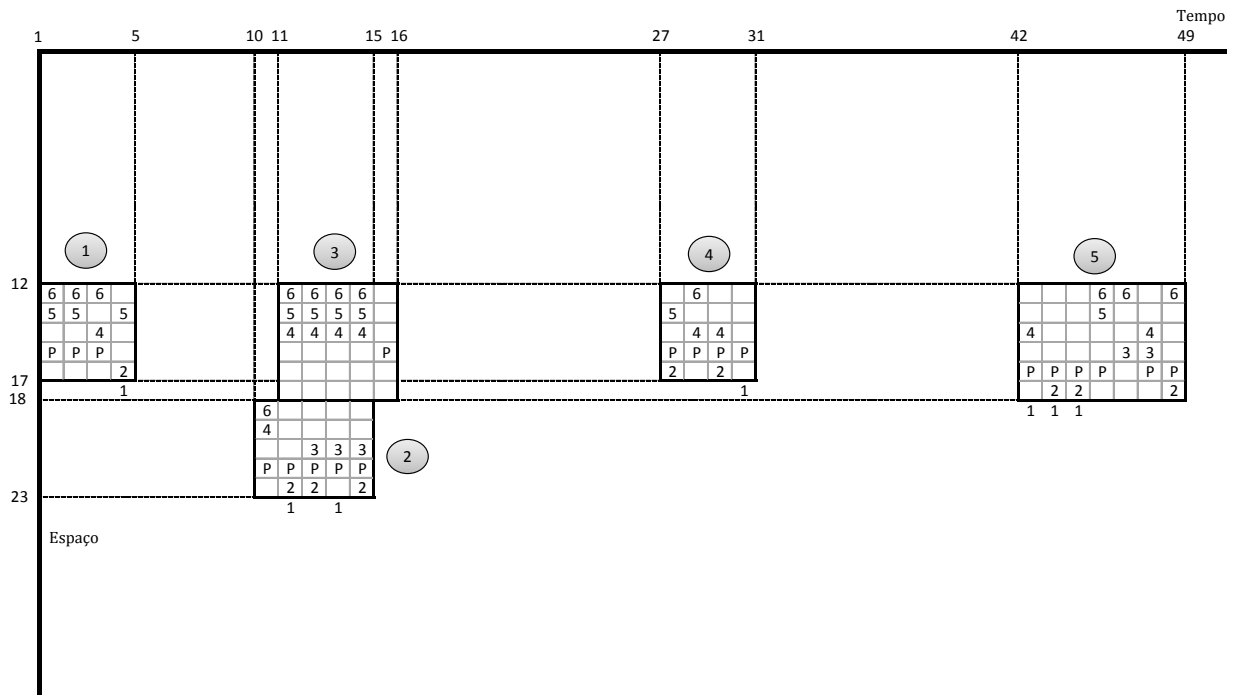


Figura 5.1: Esquema de solução do exemplo 1

O **segundo exemplo**, cujo conjunto de dados está presente no Apêndice D, conta com a entrada de seis navios. Não considerando a restrição do número de guindastes, o tempo de estadia total dos navios é de 23 horas. Já para o caso em que esta restrição é considerada o valor da solução sobe para 45 horas como se pode ver na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados obtidos para o exemplo 2

SEM restrição no nº de guindastea		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	3600	-	-15	29
	Usando RT	53	23	23	23
	Usando RC	932	23	23	23
	Usando RTC	48	23	23	23

COM restrição no nº de guindastea		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	3600	-	3	45
	Usando RT	120	45	45	45
	Usando RC	3602	-	6,16	47
	Usando RTC	236	45	45	45

Olhando para o conjunto de navios no esquema da Figura 5.2, verifica-se que a restrição do número de guindastes é respeitada. De facto, em qualquer período de tempo e em qualquer navio não existem mais de três guindastes a operarem simultaneamente.

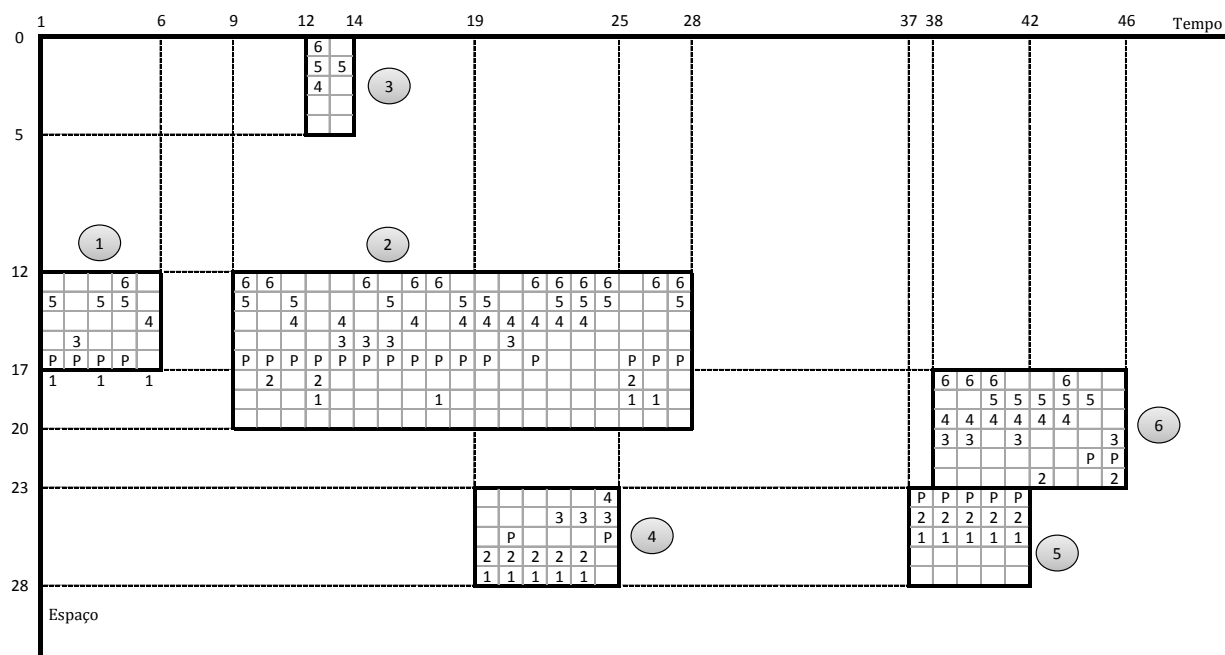


Figura 5.2: Esquema de solução do exemplo 2

Neste exemplo, ao navio 2 estão associados 15.300.000,00 kg de mercadoria. É de relembrar que o guindaste polivalente tem uma taxa de processamento de 319.000 kg/h e que os

restantes guindastes operam cerca de 263.644 kg/h. Dessa forma, e observando o esquema da solução para o caso em que se usa o conjunto RT verifica-se facilmente que a restrição (4.10) relativa à quantidade de mercadoria movimentada é satisfeita. De facto, o guindaste polivalente trabalha no navio 2 em 15 períodos de tempo movimentando dessa forma 4.785.015,00 kg. Durante 40 horas os restantes guindastes são afetos ao navio permitindo assim a movimentação de 10.545.760,00 kg de mercadoria. Na totalidade, os guindastes afetos têm capacidade para movimentar 15.330.775,00 kg o que supera os 15.300.000,00 kg de mercadoria do navio 2.

A hora de saída dos navios, c_k , fica definida de acordo com a quantidade de mercadoria associada aos mesmos, as taxas de processamento dos guindastes usados e a restrição do número de guindastes. Dessa forma, o navio 2, entrado no período 9, precisa de 19 horas em cais para terminar a operação de movimentação de carga, saindo do TN no período 28.

O **terceiro exemplo** conta com a chegada de sete navios. O valor da solução obtida para este exemplo toma o valor 18 ou 29 conforme se considera ou não a restrição do número de guindastes, tal como se pode ver na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados obtidos para o exemplo 3

SEM restricção no nº de guindastea		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	3600	-	2	19
	Usando RT	41	18	18	18
	Usando RC	348	18	18	18
	Usando RTC	86	18	18	18

COM restricção no nº de guindastea		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	3602	-	-9,58	29
	Usando RT	58	29	29	29
	Usando RC	3603	-	15	30
	Usando RTC	75	29	29	29

Os navios 1, 3 e 4 chegam no TN em períodos de tempo próximos (ver Apêndice D), pelo que se torna necessária uma distribuição agilizada dos guindastes pelos 3 navios. Observando a Figura 5.3, verifica-se que os navios 1 e 3 chegam no período 1 ocupando as posições 18 e 23 do cais respetivamente. O navio 1 fica em cais apenas 2 horas existindo nesse mesmo

período conflito com o navio 3. Verifica-se aqui que a restrição do número de guindastes é respeitada, pois em cada período de tempo e em cada navio existem apenas 3 guindastes a operar. É de notar que a impossibilidade de trocar a ordem dos guindastes também é respeitada. De facto, o navio 1 que está numa posição do cais anterior a do navio 3 vê a sua operação de movimentação de carga efetuada, no primeiro período, pelos guindastes 6, 5 e 4 enquanto que o navio 3 fica a ser operado pelos guindastes 3, 1 e o guindaste polivalente. Já no período 2, o navio 1 é operado pelos guindastes 6, 5 e 3 (estando o guindaste 4 parado) e o navio 3 tem os guindastes 1, 2 e o polivalente afetos a ele.

Relembra-se aqui que os guindastes 6, 5, 4 e 3 podem movimentar-se pelas posições 0 até 26 do cais, que o guindaste polivalente (P) apenas se pode movimentar no intervalo compreendido entre as posições 14 e 26 do cais e que os restantes guindastes, 1 e 2, podem movimentar-se desde a posição 14 até ao fim do cais.

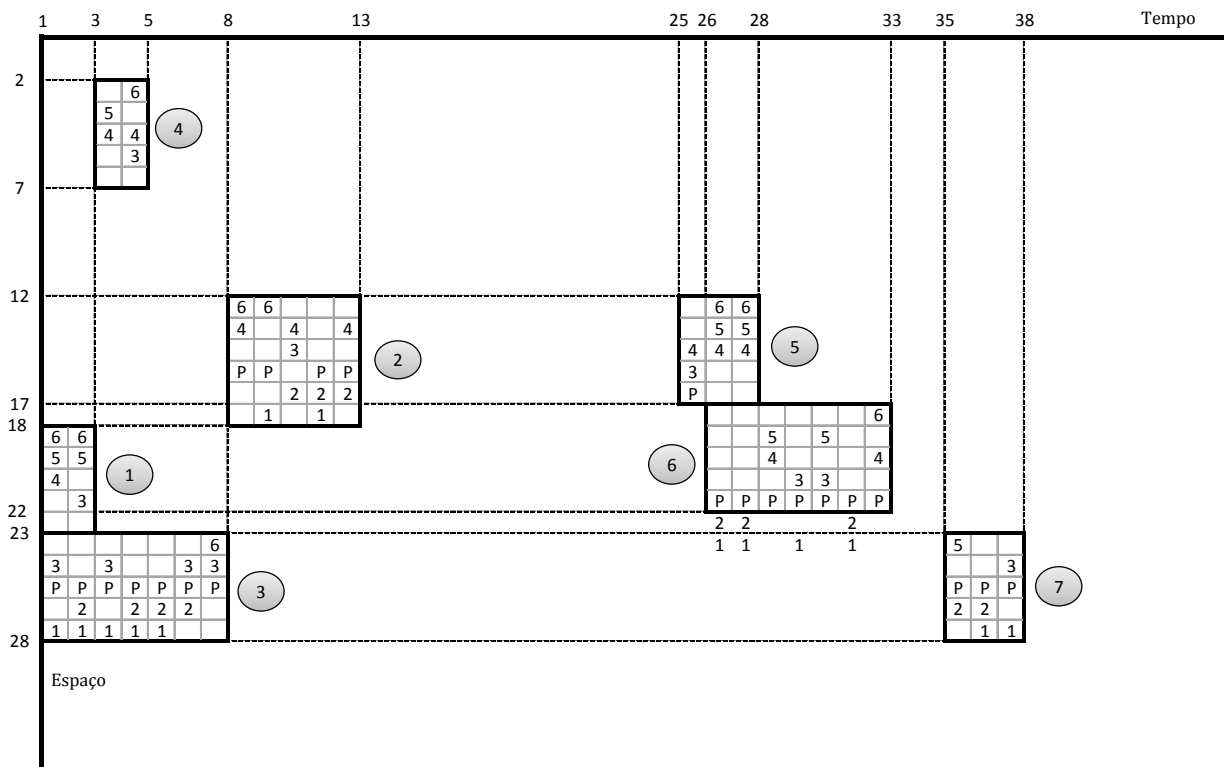


Figura 5.3: Esquema de solução do exemplo 3

Pode-se ainda verificar que o intervalo de alcance do guindaste polivalente é satisfeito. A afetação ao navio 3, que ocupa as posições 23 a 28 do cais, é possível já que este navio está todo contido no intervalo de alcance do guindaste polivalente ao qual ainda se dá uma

folga de 2 secções de cais no modelo matemático (parâmetro F_e). Para o navio 4 já não acontece, já que este ocupa a secção do cais compreendida entre as posições 2 e 7 do cais não podendo dessa forma usufruir do guindaste polivalente que só se pode movimentar a partir da posição 14.

Por fim, o **quarto exemplo** retrata uma situação de algum movimento no TN, com a entrada de oito navios em três dias. Como se pode ver na Tabela 5.4, o tempo total de operação dos oito navios é de 25 horas quando não se considera a restrição do número de guindastes, o qual duplica se esta restrição for considerada.

Tabela 5.4: Resultados obtidos para o exemplo 4

SEM restrição no nº de guindastes		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	3600	-	-39,22	26
	Usando RT	113	25	25	25
	Usando RC	3602	-	-27,27	49
	Usando RTC	313	25	25	25

COM restrição no nº de guindastes		Tempo	Valor ótimo	Limite inferior	Limite superior
	Formulação principal	3600	-	-35,99	*
	Usando RT	349	50	50	50
	Usando RC	3605	-	-40,65	116
	Usando RTC	1569	50	50	50

* - não encontrou limite superior em menos de uma hora

Na Figura 5.4 apresenta-se o esquema da solução obtida usando as RT para o caso em que apenas três guindastes podem operar por período de tempo e por navio.

Olhemos para os navios 6, 7 e 8 que estão a ser operados simultaneamente. O navio 7 está na posição 21. Dos resultados obtidos sabe-se que as variáveis y_{67} e y_{87} são iguais a 1. Interessa aqui verificar se as restrições relativas ao espaço são satisfeitas. O navio 6 ocupa a posição $b_6 = 16$ e tem um comprimento de 5 secções de cais preenchendo assim as posições 16, 17, 18, 19 e 20. O mesmo acontece para o navio 8 que ocupa a posição $b_8 = 15$ e tem um comprimento de 6 secções de cais. Dessa forma, a posição 21 fica livre para admitir o navio 7.

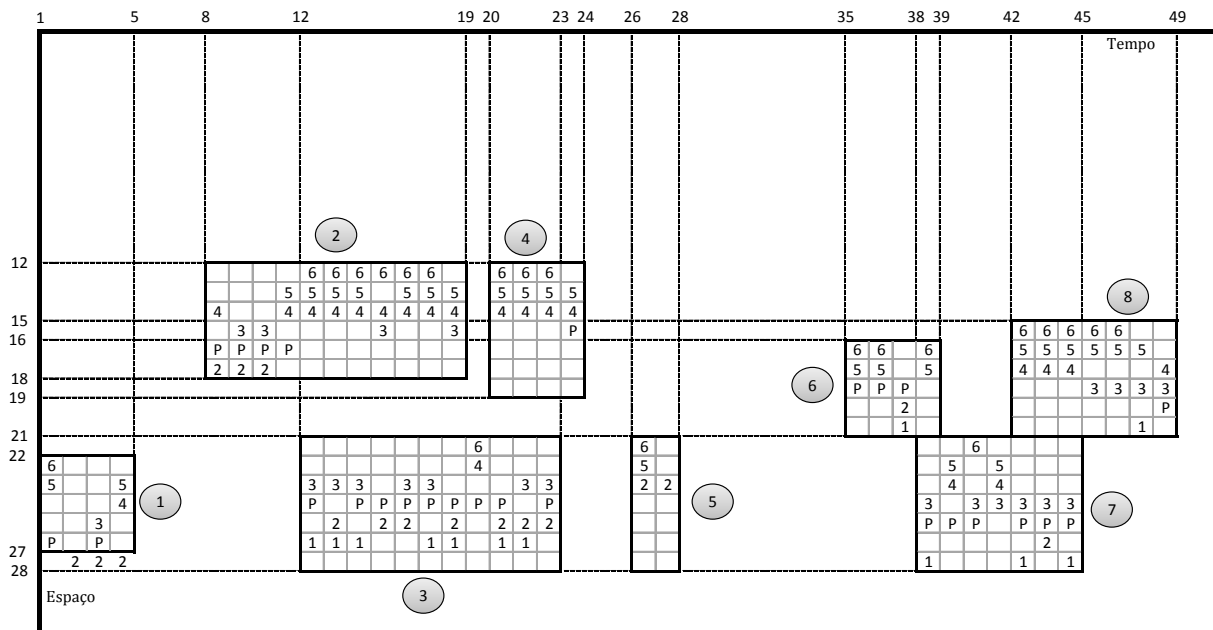


Figura 5.4: Esquema de solução do exemplo 4

Olhando para os quatro exemplos apresentados nesta secção, verifica-se que existe uma tendência para colocar os navios na zona central do cais. O objetivo do problema em causa visa minimizar o tempo total de operação de todos os navios que passam pelo TN. O guindaste polivalente que tem a taxa de processamento mais elevada (319.001 kg/h) pode movimentar-se pelas posições 14 a 26 do cais, precisamente na zona central do cais. Dessa forma, e tendo em conta que qualquer navio pode ser operado por qualquer guindaste e em qualquer posição do cais, sempre que for possível, os programas procuram colocar os navios na zona central de maneira a estes poderem ser alcançados pelo guindaste polivalente e assim conseguir diminuir o seu tempo de operação.

Olhando agora para os tempos registados na obtenção das soluções para os quatro exemplos e para os dois casos (com e sem restrição no número de guindastes), verifica-se que à medida que se aumenta o número de navios entrados no TN o tempo de obtenção da solução tende a aumentar também.

A restrição relativa ao número de guindastes que podem operar por período de tempo e por navio também aumenta o tempo de obtenção da solução. Efetivamente, esta restringe ainda mais o problema impossibilitando a afetação dos sete guindastes a um mesmo navio e aumentando a probabilidade de existirem navios a serem operados simultaneamente devido ao facto de estes ficarem mais tempo em cais.

Como já foi referido na secção 4.3, existem restrições na formulação matemática principal que contribuem para a diminuição do limite inferior da solução aumentando, dessa forma, o tempo de obtenção da solução.

Os programas relativos à formulação principal e à variante RC apresentam resultados bastante semelhantes relativamente aos tempos de execução. De facto, demoram muito tempo na obtenção da solução, existindo casos em que não encontram o valor da solução ótima em menos de uma hora. Tal facto pode ser explicado pela não substituição da restrição (4.11) e pela presença das restrições (4.4) e (4.8) relativas ao tempo. Nos casos em que não é encontrada a solução ótima, verifica-se que, de facto, os limites inferiores são relativamente baixos em comparação ao valor da solução ótima encontrada nos outros casos.

As variantes RT e RTC, por sua vez, apresentam o mesmo comportamento, conseguindo obter a solução ótima rapidamente demorando nunca mais de meia hora. O facto de se ter escolhido o resultado obtido com a variante RT para a apresentação dos esquemas está diretamente ligado com a pouca demora verificada na obtenção das soluções.

5.2 Resultados obtidos usando a decomposição da formulação matemática principal

Como já foi referido anteriormente na secção 4.5, pode-se ainda tratar o problema em causa separadamente achando, numa primeira fase, as posições dos navios no cais para depois efetuar a afetação dos guindastes aos mesmos.

Para o conjunto de dados do quarto exemplo (ver Apêndice D), da procura da disposição dos navios no cais resultam os valores para as variáveis presentes na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Variáveis inicializadas na decomposição do problema

$x_{12} = 1$	$y_{24} = 1$	$v_1^1 = 1$	$b_1 = 0$
$x_{13} = 1$	$y_{32} = 1$	$v_2^8 = 1$	$b_2 = 8$
$x_{14} = 1$	$y_{34} = 1$	$v_3^{12} = 1$	$b_3 = 27$
$x_{16} = 1$	$y_{35} = 1$	$v_4^{20} = 1$	$b_4 = 0$
$x_{17} = 1$	$y_{36} = 1$	$v_5^{26} = 1$	$b_5 = 14$
$x_{18} = 1$	$y_{51} = 1$	$v_6^{35} = 1$	$b_6 = 0$
$x_{26} = 1$	$y_{52} = 1$	$v_7^{38} = 1$	$b_7 = 5$
$x_{27} = 1$	$y_{54} = 1$	$v_8^{42} = 1$	$b_8 = 28$
$x_{28} = 1$	$y_{76} = 1$		
$x_{37} = 1$	$y_{85} = 1$		
$x_{38} = 1$	$y_{86} = 1$		
$x_{46} = 1$	$y_{87} = 1$		
$x_{47} = 1$			
$x_{48} = 1$			
$x_{56} = 1$			
$x_{57} = 1$			

Observe-se aqui que a posição do navio 8 será a 28 ($b_8 = 28$) e que este iniciará a sua operação no período 42 ($v_8^{42} = 1$). Este navio não poderá então usufruir do trabalho do guindaste polivalente já que este não se encontra na totalidade no intervalo de alcance do guindaste. Desta forma, espera-se que o tempo de estadia deste navio seja maior do que aquele que foi obtido na solução apresentada na Figura 5.4. O navio 8 tem 5.533.325 kg de mercadoria para movimentar e começa a sua operação no período 42, hora a qual ele entra no TN. Tendo, no máximo, a operação de dois guindastes (1 e 2) este navio precisará de ficar em cais pelo menos $5.533.325 / (2 \times 263.644) \approx 11$ horas, sendo dessa forma necessário aumentar o horizonte temporal considerado até agora.

Fixando estes valores, pretende-se agora efetuar a afetação dos guindastes usando para tal a formulação matemática principal com as RT.

De seguida, apresenta-se na Figura 5.5 o esquema da solução obtida para a decomposição do problema. Comparando com a Figura 5.4, verifica-se que o tempo total de estadia dos navios aumenta para 62 horas. Tal facto explica-se pelo aumento do tempo de estadia dos navios 2, 3, 7 e 8 que, aqui, precisam de mais 1, 6, 1 e 4 horas, respetivamente, do que na solução anterior. O tempo de trabalho destes quatro navios aumenta pois, nesta solução, encontram-se fora do intervalo de alcance do guindaste polivalente. Assim, apenas os guindastes 1 e 2 com um taxa de processamento inferior a do guindaste polivalente os

podem operar.

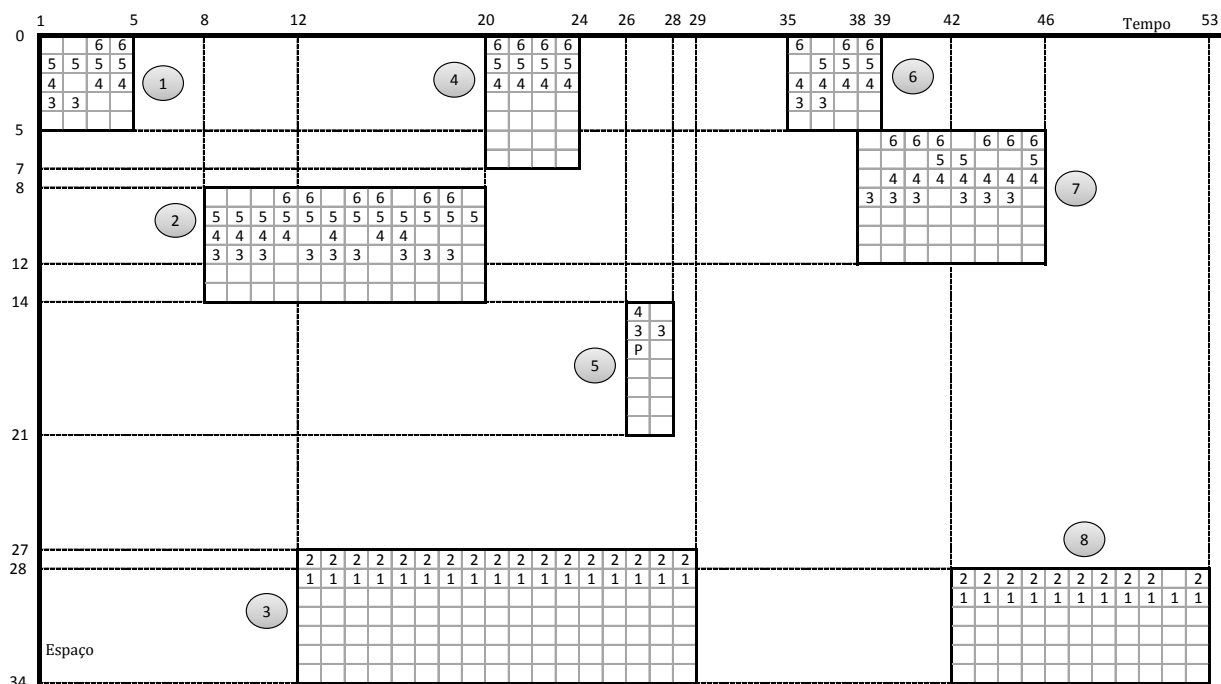


Figura 5.5: Esquema de solução do exemplo 4 usando a decomposição do problema

Como era de esperar, esta solução não é tão boa como a obtida na secção anterior, mas tem a vantagem de ser obtida em menos de cinco minutos.

5.3 Resultados obtidos minimizando o número de trocas de guindastes

Olhando para os resultados obtidos na secção 5.1, podemos afirmar que estes já são satisfatórios. De facto, consegue-se respeitar as restrições impostas pelos modelos minimizando o tempo de estadia dos navios no TN: não existe conflito de navios no tempo nem no espaço, não é trocada a ordem dos guindastes que operam num único navio de cada vez e, pode-se obrigar a que, no máximo, existam três guindastes a operar por período de tempo.

Porém, olhando para a Figura 5.4, verifica-se que os sete guindastes podem ser afetos a um mesmo navio em períodos de tempo diferentes, como é o caso do navio 2. Na prática, não é de esperar que o CCOP afete os sete guindastes a um mesmo navio, pois torna a organização do cais, dos guindastes (trocas) e das equipas de trabalho bastante complicada.

É mais comum verificar situações em que um conjunto de guindastes é atribuído a um navio e que estes fiquem a opera-lo até sair do TN. No entanto, pode existir trocas de guindastes entre navios caso esteja em cais outro navio que precise da operação de um dos guindastes.

De maneira a evitar este tipo de situações, tenta-se então minimizar o número de trocas de guindastes usando para tal os resultados obtidos anteriormente para as variáveis b_k , t_k e c_k . Dessa forma, não se altera o valor da solução ótima, que para o caso do exemplo 4, atinge as 50 horas de trabalho. Pretende-se apenas afetar os guindastes de maneira a não existirem tantas trocas de guindaste num mesmo navio.

Tabela 5.6: Variáveis inicializadas para minimizar as trocas de guindastes

Navio k .	b_k	t_k	c_k
1	22	1	5
2	12	8	19
3	21	12	23
4	12	20	24
5	21	26	28
6	16	35	39
7	21	38	45
8	15	42	49

Inicializando as variáveis apresentadas na Tabela 5.6 obtém-se a solução apresentada na Figura 5.6.

Observando o esquema, verifica-se que continuam a ser respeitadas as restrições referidas anteriormente à diferença de que não existem tantas trocas de guindastes. Exemplo disso é o navio 2 que agora só é operado pelos guindastes 5, 4, 3 e o polivalente. Não deixando de respeitar o conjunto de restrições, consegue-se obter uma situação mais viável para o CCOP.

De maneira a obter uma solução ainda mais próxima do que é feito pelo CCOP no que se refere à maneira como são afetos os guindastes pelos navios, poderia-se obrigar a que os guindastes que operam num navio sejam consecutivos. Dessa forma, o navio 1 seria operado por um dos seguintes conjuntos de guindastes: $\{4, 3, P\}$, $\{3, P, 2\}$ ou $\{P, 2, 1\}$.

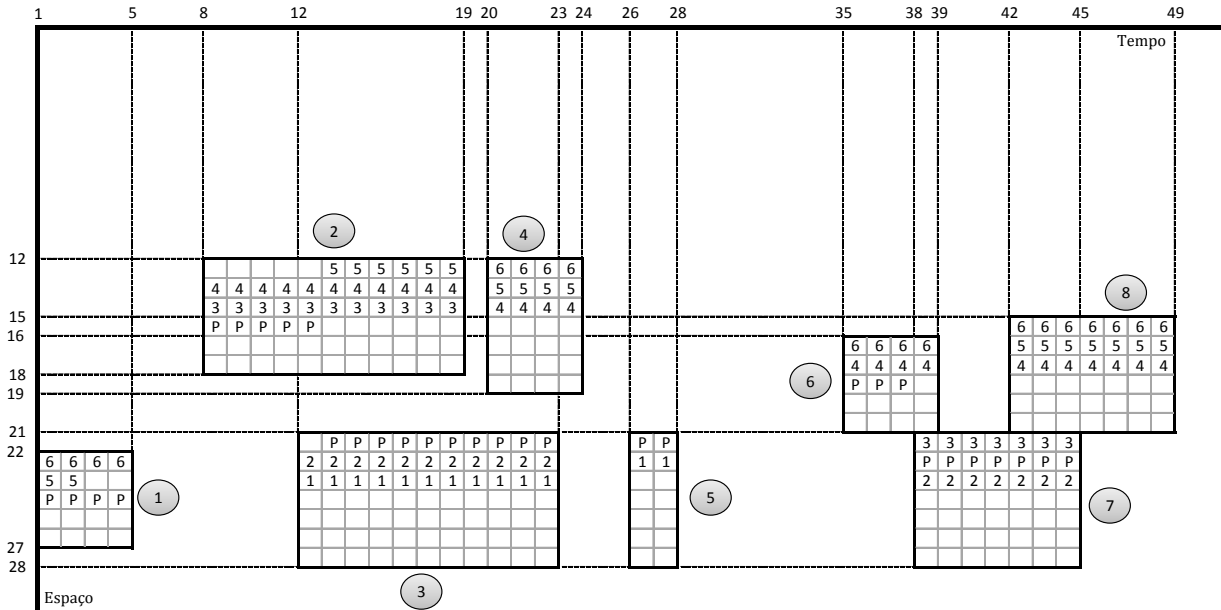


Figura 5.6: Esquema de solução do exemplo 4 minimizando as trocas de guindastes

5.4 Comparação dos resultados obtidos

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos para os quatro exemplos, apresenta-se de seguida uma tabela resumo (ver Tabela 5.7) onde constam os valores obtidos para o tempo de execução dos vários programas e o valor ótimo bem como os limites inferior e superior da solução ótima para os vários modelos matemáticos apresentados anteriormente, nomeadamente: a formulação matemática principal e as suas variantes (sem ou com restrição do número de guindastes), a minimização do número de trocas de guindastes e a decomposição do problema.

Como já foi referido anteriormente, as formulações matemáticas que usam as RT e as RTC são as que obtêm a solução ótima para os quatro exemplos mais rapidamente. Já para o caso em que se usa a formulação matemática principal ou quando são consideradas as RC, a solução ótima é obtida com mais tempo e por vezes não é encontrada quando o número de navios considerados for maior. Verifica-se ainda que, usando as RC, os limites encontrados são mais satisfatórios do que os encontrados com a formulação matemática principal.

Como era de esperar, os tempos de execução dos programas para a decomposição do

problema são relativamente baixos, demorando, no máximo, cerca de 5 minutos. Nesta alternativa, o valor da solução ótima é maior do que aquele obtido usando os outros modelos. De facto, na primeira fase, colocam-se os navios no cais e estes podem ficar fora do alcance do guindaste polivalente fazendo com que o seu tempo de operação seja maior, pelo que o valor ótimo melhora da primeira para a segunda fase. É de notar que na segunda fase usa-se o modelo matemático com as RT mas que como são inicializadas as variáveis relativas às posições dos navios o seu tempo de execução vê-se bastante reduzido.

No que toca à minimização das trocas de guindastes, os tempos de execução dos programas para os quatro exemplos são residuais. É de notar que o valor da solução ótima fica inalterado existindo apenas alterações nos conjuntos de guindastes que operam cada navio.

Tabela 5.7: Comparação dos resultados obtidos

			Exemplo 1				Exemplo 2				Exemplo 3				Exemplo 4			
			Tempo	Valor ótimo	Limite		Tempo	Valor ótimo	Limite		Tempo	Valor ótimo	Limite		Tempo	Valor ótimo	Limite	
					Inferior	Superior			Inferior	Superior			Inferior	Superior			Inferior	Superior
SEM restrição nº guindastes	Formulação principal		1294	13	13	13	3600	-	-15	29	3600	-	2	19	3600	-	-39,22	26
	RT		30	13	13	13	53	23	23	23	41	18	18	18	113	25	25	25
	RC		665	13	13	13	932	23	23	23	348	18	18	18	3602	-	-27,27	49
	RTC		25	13	13	13	48	23	23	23	86	18	18	18	313	25	25	25
COM restrição nº guindastes	Formulação principal		3600	-	-10	25	3600	-	3	45	3602	-	-9,58	29	3600	-	-35,99	*
	RT		18	25	25	25	120	45	45	45	58	29	29	29	349	50	50	50
	RC		3601	-	11	25	3602	-	6,16	47	3603	-	15	30	3605	-	-40,65	116
	RTC		15	25	25	25	236	45	45	45	75	29	29	29	1569	50	50	50
	Decomposição do problema	1ª fase	45	37	37	37	34	72	72	72	294	52	52	52	284	87	87	87
		2ª fase	0	28	28	28	2	59	59	59	1	38	38	38	0	62	62	62
	Minimização das trocas de guindastes	RT	18	25	25	25	120	45	45	45	58	29	29	29	349	50	50	50
		Trocas de guindastes	1	25	25	25	1	45	45	45	1	29	29	29	1	50	50	50

* - não encontrou limite superior em menos de uma hora

Capítulo 6

Conclusão

A realização do estágio na APA permitiu a aplicação de conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico num ambiente organizacional bem como a descoberta do “mundo do trabalho”. O estágio proporcionou ainda uma experiência a nível pessoal com o contacto estabelecido no dia-a-dia com os diversos colaboradores que se mostraram sempre disponíveis em ajudar.

O porto de Aveiro dispõe do TN, o qual está sob gestão portuária do tipo *ToolPort*. Dessa forma, as infraestruturas e as superestruturas são da responsabilidade do TN, mais particularmente do CCOP. Nos últimos anos tem-se verificado um aumento no número de navios entrados no TN bem como na quantidade de mercadorias movimentada por eles, daí a importância do estudo realizado no presente relatório de estágio. De facto, com a crescente evolução do TN, o qual dispõe de um cais de 900 metros e de sete guindastes torna-se interessante e importante agilizar da melhor maneira possível os recursos disponíveis em cais. Os modelos matemáticos apresentados neste relatório focam-se então na resolução do problema da afetação dos postos e dos guindastes aos navios que dão entrada no TN do porto de Aveiro. Tendo em conta o funcionamento e as características do TN, tentou-se obter a melhor solução e a mais viável possível para o CCOP minimizando o tempo total de estadia dos navios.

Os modelos matemáticos desenvolvidos foram aplicados no *software Xpress-Optimizer* e para quatro exemplos diferentes, com o objetivo de comparar a eficiência de diferentes abordagens, a qual foi avaliada relativamente ao tempo de execução dos programas.

Numa primeira fase, desenvolveu-se a formulação matemática principal. Esta tem a vantagem de originar limites inferiores para a solução ótima fracos pelo que se optou por

criar os conjuntos de restrições RT, RC e RTC. Acrescentando a restrição relativa ao número de guindastes, as soluções obtidas tornam-se mais viáveis para a realidade do TN, já que passam a poder operar, no máximo, três guindastes por período de tempo e por navio. Em termos de eficiência dos modelos, o conjunto RT é o que mostra resultados mais satisfatórios, nunca demorando mais do que 350 segundos para a obtenção da solução ótima.

Numa segunda fase, e tendo em conta os resultados inicialmente obtidos, optou-se por tentar minimizar as trocas de guindastes pelos navios de maneira a evitar que todos os guindastes disponíveis em cais possam operar num navio. Dessa forma, o valor da solução ótima não fica alterado mas a solução obtida fica “operacionalmente” mais aceitável para o CCOP existindo, para cada navio, um conjunto de três guindastes (no máximo) que o operam até à sua saída do TN.

Numa última fase, e de maneira a comparar a eficiência dos modelos, optou-se por decompor o problema, achando primeiro o posicionamento dos navios no cais para depois, conforme as suas posições, efetuar a afetação dos guindastes. Esta alternativa traz a vantagem de obter as soluções mais rapidamente já que, numa primeira fase, apenas são encontradas as posições dos navios para posteriormente serem inicializadas no modelo que usa as RT e assim obter a afetação dos guindastes. Por outro lado, tem a desvantagem de obter uma solução não tão boa como a obtida com a formulação matemática principal e as suas variantes, pois pode posicionar os navios fora do alcance do guindaste polivalente pelo que a operação dos navios pode vir a ser mais demorada.

De acordo com a realidade do TN, o modelo matemático mais adequado para solucionar o problema do posicionamento dos navios no cais e da afetação dos guindastes seria o que usa as RT minimizando as trocas de guindastes. Dessa forma, obtem-se uma solução rapidamente, que satisfaz as condições do CCOP e que se aproxima dos procedimentos já usados pelo CCOP relativamente à afetação dos guindastes (conjunto de três guindastes, no máximo, que operam até à saída do navio).

Por fim, através do estágio percebeu-se que a atividade portuária pertence a um mundo bastante complexo no qual a tomada de decisões é, geralmente, feita na hora sendo bastante complexa a aplicação de modelos matemáticos que tenham em conta todas as características da envolvente do problema. O projeto apresentado neste relatório não deixa de ser importante e interessante para a entidade acolhedora, mostrando que a sua tomada de decisões pode ser complementada com este tipo de estudos.

Bibliografia

- [1] Amorim, I. PORTO DE AVEIRO: Entre a Terra e o Mar. APA - Administração do Porto de Aveiro, S.A., 2008. Aveiro, Portugal.
- [2] Ak, A. (2008). *Berth and quay crane scheduling: Problems, models and solution methods*. Georgia Institute of Technology.
- [3] Bierwith C, Meisel F. (2010). *A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals*. European Journal of Operational Research, vol. 202 (3): 615-627.
- [4] Carvalho, J. (2013) Dar a Volta ao Transporte Marítimo. Cluster do Mar, Fevereiro-Março 2013: 26-29.
- [5] Dicionário Básico Portuário, 2ª Edição. Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, 2011.
- [6] Guan Y, Yan K.H, Zhou Z. (2010). *The crane scheduling problem: models and solution approaches*. Annals of Operations Research, vol. 203 (1): 119-139.
- [7] Imai A, Chen H.C, Nishimura E, Papadimitriou S. (2008). *The simultaneous berth and quay crane allocation problem*. Transportation Research Part E, vol. 44: 900-920.
- [8] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. (2001). *The dynamic berth allocation problem for a container port*. Transportation Research Part B, vol. 35: 401-417.
- [9] Imai A, Sun X, Nishimura E, Papadimitriou S. (2005). *Berth allocation in a container port: using a continuous location approach*. Transportation Research Part B, vol. 39 (3): 199-221.
- [10] Kim K.H, Park Y.M. (2004). *A crane scheduling method for port container terminals*. European Journal of Operational Research, vol. 156 (3): 752-768.

- [11] Lim A. (1998). *The berth planning problem*. Operation Research Letters, vol. 22: 105-110.
- [12] Lim A, Rodrigues B, Xiao F, Zhu Y. (2004). *Crane scheduling with spatial constraints*. Naval Research Logistics, vol. 51 (3): 386-406.
- [13] Liu J, Wan Y.W, Wang L. (2005). *Quay crane scheduling at container terminals to minimize the maximum relative tardiness of vessel departures*. Naval Research Logistics, vol. 53 (1): 60-74.
- [14] Monteiro, M.F.F. (2010) A Importância dos Portos na Economia. Revista Marinha, Dezembro 2010-Janeiro 2011, vol. 959: 26-28.
- [15] Park Y.M, Kim K.H. (2003). *A scheduling method for berth and quay cranes*. OR Spectrum, vol. 25: 1-23.
- [16] Relatório de Sustentabilidade 2012. APA - Administração do Porto de Aveiro, S.A., 2014.
- [17] Relatório de Sustentabilidade 2012. APFF - Administração do Porto da Figueira da Foz, S.A., 2014.
- [18] Sequeira, L. (2013) O desenvolvimento do transporte marítimo e a actividade portuária. Cluster do Mar, Fevereiro-Março 2013: 36-39.
- [19] Portal da APA (www.portodeaveiro.pt)
- [20] Portal da APFF (www.portofigueiradafoz.pt)

Apêndice A

Notícia do mês de maio de 2014 da APA

PRIMEIRO QUADRIMESTRE DE 2014

O melhor de sempre no Porto de Aveiro, com a ferrovia a atingir valores máximos

2014 dá continuidade ao crescimento que se tem vindo a notar desde o início do ano, alcançando novos máximos no que diz respeito à quantidade de mercadorias movimentadas no Porto de Aveiro.



Nos primeiros quatro meses de 2014 o Porto de Aveiro atingiu as 1.512.425,70 toneladas de tráfego de mercadorias movimentadas. Em relação a 2013, o melhor ano do porto, verificou-se um acréscimo de 14,31% (mais 189.321,30 toneladas). Comparativamente a 2012 nota-se uma subida mais acentuada de 46,35% (mais 478.988,70 toneladas).

As exportações superiorizaram-se às importações em cerca de 6 pontos percentuais, atingindo-se respetivamente 800.979,30 toneladas (52,96% do movimento total) e 711.446,40 toneladas (47,04% do movimento total).

Com 639.983,50 toneladas, o segmento da Carga Geral teve um papel crucial na performance do porto, tendo uma representatividade de 42,32% do movimento total. Relativamente a 2013 teve um crescimento de 12,60% (mais 71.596,90 toneladas) e 76,50% (mais 277.379,40 toneladas) em relação a 2012. É de salientar que as exportações constituíram 72,51% do movimento total deste segmento, subindo 23,43% em relação a 2013 e 112,62% em relação a 2012.

Os Granéis Sólidos (32,55% do movimento total) atingiram 492.284,00 toneladas, subindo 14,33% (mais 61.706,00 toneladas) em relação a 2013 e 35,59% (mais 129.208,10 toneladas) em relação a 2012, com as exportações a superarem as importações em cerca de 4 pontos percentuais.

Os Granéis Líquidos (25,12% do movimento total) chegaram às 379.996,20 toneladas, apresentando um crescimento de 17,27% (mais 55.970,00 toneladas) em relação a 2013 e 23,47% (mais 72.239,20 toneladas) em relação a 2012.

A utilização da ferrovia continuou a atingir valores máximos. O total de mercadorias que entraram e saíram do Porto de Aveiro por esse modo de transporte foi de 286.636,28 toneladas o que representa 19% do total movimentado, crescendo em 30% (mais 65.533,08 toneladas) em relação ao período homólogo de 2013. O número de comboios recebidos até ao final de abril foi de 526 o que traduz um crescimento em relação ao mesmo período de 2013, de 54% (mais 184 comboios).

Data: 2014-05-15

(Disponível em: <http://ww2.portodeaveiro.pt/sartigo/index.php?x=6189>)

Apêndice B

Exemplo de escala diária de pessoal do Terminal Norte



TURNO, 17/24

(ESCALA DE PESSOAL EM REGIME DE TURNOS, E, I, H, T.)

DATA: 2014-06-04

QUARTA - FEIRA

Operadores de Equipamento Portuario

P. Operário

Agents/Op. de cais

Apêndice C

Exemplo de pedido de requisito de guindastes

A P A	REQUISIÇÃO DE SERVIÇOS		NR.
Guindaste:	Empilhadores:		
Pá Carregadora:	Tractores:	Zorras:	
Aparatos:	Baldes:	Encerados:	Esteres: Estrados:
Estropos:	Funis :	Grabes:	Spreader:
Rebocador:			
Fornecimento de			
Fornecimento de energia eléctrica a			amperes
para as	horas do dia		
para efectivação de serviço de			
OBS.:			
Responsável pela requisição:	AVEIPOINT, LDA		
Data	03-06-2014	Assinatura	Helder Rocha
Entrada nos Serviços	03-06-2014	Hrs	16 29 Rubrica



A P A	REQUISIÇÃO DE SERVIÇOS		NR.
Guindaste:	16E		Empilhadores:
Pá Carregadora:	Tractores:	Zorras:	
Aparatos:	Baldes:	Encerados:	Esteres: Estrados:
Estropos:	Funis :	Grabes:	Spreader:
Rebocador:			
Fornecimento de			
Fornecimento de energia eléctrica a			amperes
para as	17:00	horas do dia	03.06.2014
para efectivação de serviço de	CARGA DE CIMENTO EM PACOTÃO		
M/V " " "			
OBS.:			
Responsável pela requisição:	AVEIPOINT, LDA		
Data	03-06-2014	Assinatura	Helder Rocha
Entrada nos Serviços	03-06-2014	Hrs	16 29 Rubrica



A P A	REQUISIÇÃO DE SERVIÇOS				NR.
Guindaste:	POLIVALENTE*		Empilhadores:		
Pá Carregadora:	Tractores:		Zorras:		
Aparatos:	Baldes:	Encerados:	Esteres:	Estrados:	
Estropos:	Funis :	Grabes:	Spreader:		
Rebocador:					
Fornecimento de					
Fornecimento de energia eléctrica a					amperes
para as	17:00	horas do dia	03.06.2014		
para efectivação de serviço de	DESCARGA DE BOBINES				
	M/V " " "				
OBS.:	* POLIVALENTE das 17:00 às 20:00				
Responsável pela requisição:	AVEIPOINT, LDA				
Data	03-06-2014	Assinatura	<i>Helder Rocha</i>		
			 		
Entrada nos Serviços	03-06-2014	Hrs	16 29	Rubrica	

Apêndice D

Dados dos exemplos

Dados Exemplo 1

Navio	Hora de chegada	Quantidade (KG)	Comprimento (em secções de cais)
1	1	3.071.406	5
2	10	3.985.914	5
3	11	3.412.285	6
4	27	2.737.918	5
5	42	5.238.393	6

Dados Exemplo 2

Navio	Hora de chegada	Quantidade (KG)	Comprimento (em secções de cais)
1	1	3.460.768	5
2	9	15.300.000	8
3	12	996.368	5
4	19	4.252.540	5
5	37	3.937.378	5
6	38	6.035.107	6

Dados Exemplo 3

Navio	Hora de chegada	Quantidade (KG)	Comprimento (em secções de cais)
1	1	1.562.810	5
2	8	4.135.575	6
3	1	5.731.913	5
4	3	1.277.780	5
5	25	2.324.755	5
6	26	5.731.913	5
7	35	2.507.515	5

Dados Exemplo 4

Navio	Hora de chegada	Quantidade (KG)	Comprimento (em secções de cais)
1	1	2.741.515	5
2	8	8.852.376	6
3	12	8.799.262	7
4	20	3.131.000	7
5	26	1.002.500	7
6	35	3.029.000	5
7	38	5.731.913	7
8	42	5.533.325	6

Taxas de processamento dos guindastes

	KG/h
G.E	263.644
POLI	319.001

Intervalo de alcance no cais dos guindastes

	G.E.1	G.E.2	POLI	G.E.3	G.E.4	G.E.5	G.E.6
Início - i_g	14	14	14	0	0	0	0
Fim - f_g	34	34	26	26	26	26	26